

Министерство образования и науки РФ

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

Владимирский государственный университет

ТРУДЫ
ВЛАДИМИРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА

Выпуск 7

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНДУСТРИИ
НАНОСИСТЕМ И МАТЕРИАЛОВ

Владимир 2010

УДК 539.1/.2(06)

ББК 22.38я431

Т78

Редакционная коллегия:

В.В. Морозов, д-р техн. наук, профессор (гл. редактор)

В.Н. Ланцов, д-р техн. наук, профессор (зам. гл. редактора)

В.А. Немонтов, канд. техн. наук, доцент

В.Г. Прокошев, д-р физ.-мат. наук, профессор

С.М. Аракелян, д-р физ.-мат. наук, профессор

А.А. Давыдов, д-р физ.-мат. наук, профессор

Н.И. Дубровин, д-р физ.-мат. наук, профессор

В.В. Дорожков, канд. техн. наук, доцент

А.Ю. Скировский, директор издательства

Д.В. Абрамов, канд. физ.-мат. наук, доцент (отв. секретарь)

В седьмой выпуск сборника включены статьи сотрудников университета, содержащие результаты, полученные в ходе исследований, относящихся к приоритетному направлению развития науки, технологии и техники «Индустрия наносистем и наноматериалов». В выпуске объединены материалы, отражающие достижения в изучении физических основ нанотехнологий, математического моделирования, а также технические и технологические аспекты.

Сборник представляет интерес для специалистов, работающих в данном направлении, а также может быть использован преподавателями при работе со студентами.

УДК 539.1/.2(06)

ББК 22.38я431

ISBN 978-5-9984-0115-2

© Владимирский государственный
университет, 2010

СОДЕРЖАНИЕ

О.Н. Большакова, Д.С. Ногтев, О.Б. Телушко, К.С. Хорьков, М.Н. Герке, В.Г. Прокошев, С.М. Аракелян ФОРМИРОВАНИЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ В ВАКУУМЕ.....	7
А.Ф. Галкин, М.Н. Герке, С.В. Жирнова, Е.Л. Шаманская ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ СТРУКТУРЫ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ СО СТЕКЛОУГЛЕРОДОМ.....	12
В.В. Ионин, Д. Ю. Павлов, Н.Н. Давыдов ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ НАНООТВЕРСТИЙ КОРОТКО- ИМПУЛЬСНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ.....	14
Д.В. Абрамов, С.В. Жирнова, И.М. Логинова, С.А. Маков, В.Г. Прокошев ФОРМИРОВАНИЕ МИКРО- И НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МАССИВОВ КРИСТАЛЛОВ ОКСИДА ЦИНКА ПРИ ЛАЗЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ.....	16
Д.Ю. Павлов, В.И. Ионин, Н.Н. Давыдов АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ИЗМЕРЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКИХ МИКРО- И НАНОПАРАМЕТРОВ ОБОСОБЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ.....	21
Д.И. Белов МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНЫХ УДАРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ В СИСТЕМЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО АНАЛИЗА ANSYS.....	23
М.С. Беспалов БЕСКОНЕЧНЫЕ МАТРИЦЫ С ФИНИТНЫМИ СТОЛБЦАМИ.....	26
А.А. Бурцев, М.Н. Герке, О.Я. Бутковский ПАССИВНЫЕ МОДУЛЯТОРЫ НА ОСНОВЕ ОДНОСТЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК.....	31

Л.В. Грунская, В.А. Ефимов, А.А. Закиров, Д.В. Рубай СОЛНЕЧНЫЕ И ЛУННЫЕ ПРИЛИВЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ И ГЕОМАГНИТНОМ ПОЛЯХ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ.....	34
Д.Я. Данченко О МНОЖЕСТВАХ СУЩЕСТВОВАНИЯ ОЦЕНОК ТИПА МАРКОВА-БЕРНШТЕЙНА ДЛЯ ПРОИЗВОДНЫХ РАЦИОНАЛЬНЫХ ДРОБЕЙ.....	39
А.А. Кузнецов, А.В. Гущин СТРУКТУРНО-ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ДИАГРАММ СИГНАЛОВ.....	42
Н. Г. Конопасов, А. А. Кузнецов, В. Н. Кунин ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВИХРЕВЫХ КОЛЕЦ В СВОБОДНОЙ АТМОСФЕРЕ.....	45
А.А. Антипов, С.М. Аракелян, С.В. Кутровская, А.О. Кучерик, Д.С. Ногтев, В.Г. Прокошев ФОРМИРОВАНИЕ ПРОТЯЖЕННЫХ МАССИВОВ НАНОСТРУКТУР ПРИ ОСАЖДЕНИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦ ИЗ КОЛЛОИДНЫХ РАСТВОРОВ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ.....	49
А.В. Лоханов, А.В. Осин, М.В. Руфицкий КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ MESH-СЕТИ СТАНДАРТА IEEE 802.11S В СИСТЕМАХ GPSS И MATLAB С ИЗМЕНЯЕМЫМ КОЛИЧЕСТВОМ КАНАЛОВ УСТРОЙСТВА.....	55
А.В. Лоханов, А.В. Осин, М.В. Руфицкий МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ MESH-СЕТИ С ВОСХОДЯЩИМ ТРАФИКОМ.....	56
Д. С. Милованов РАСЧЕТ ПОРОГА ПЕРКОЛЯЦИИ ДЛЯ НАНОТРУБОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УНИВЕРСАЛЬНОГО ПАРАЛЛЕЛЬНОГО СЕТЕВОГО СИМУЛЯТОРА.....	60
О.Р. Никитин, А.В. Породников ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В ЗАДАЧАХ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПРИРОДНЫХ СРЕД НА ОСНОВЕ ДАННЫХ МИКРОВОЛНОВОГО МОНИТОРИНГА.....	62
О. Р. Никитин, А. Н. Кисляков, А. А. Шулятьев МЕТОД МИКРОВОЛНОВОГО МНОГОСПЕКТРАЛЬНОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В ЗАДАЧЕ МОНИТОРИНГА ЛЕСНЫХ МАССИВОВ.....	66

А.В. Осин СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ МАЛОПОТРЕБЛЯЮЩИХ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ.....	71
А.В. Осин СИНЕРГИЯ НАНОЭФФЕКТОВ НА ПРИМЕРЕ АВТОНОМНОГО ИНДИКАТОРА ВИБРАЦИЙ.....	73
А.А. Антипов, С.В. Кутровская, А.О. Кучерик, Д.С. Ногтев, А.В.Осипов УПРАВЛЯЕМЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ СИНТЕЗ УГЛЕРОДНЫХ НАНОВОЛОКОН И НАНОКЛАСТЕРОВ ВО ВНЕШНИХ ПОЛЯХ.....	75
О.Р. Никитин, В.Г. Рау, Н.Н. Корнеева, К.В. Скворцов ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ НЕПЕРИОДИЧЕСКИХ СВЕРХРЕШЕТОК ДЛЯ НАНОТЕХНОЛОГИЙ.....	83
О.Р. Никитин, В.Г. Рау, Н.Н. Корнеева, К.В. Скворцов ФРАКТАЛЬНЫЕ АНТЕННЫ ИЗ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК.....	85
А.В. Романов, Е.Н. Талицкий ПОЛИМЕРНАЯ МАТРИЦА ДЛЯ ВИБРОПОГЛОЩАЮЩИХ НАНОПОЛИМЕРОВ.....	88
М.Ю. Звягин, М.М. Рожков, П.Ю. Шамин К ВОПРОСУ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕКСТУРНЫХ КАРТ ЛАВСА ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ЛИЦ В РАМКАХ ПРОБЛЕМЫ ОДНОГО ЭТАЛОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ.....	90
В.Д. Булаев, С.Л. Лысенко, С.Ю. Данилов СИСТЕМЫ НАКАЧКИ ЭЛЕКТРОИОНИЗАЦИОННОГО ЛАЗЕРА. ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ.....	92
В.Д. Булаев, С.Л. Лысенко, Н.Н. Давыдов СИСТЕМЫ НАКАЧКИ ЭЛЕКТРОИОНИЗАЦИОННОГО ЛАЗЕРА. ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОДНЫХ СИСТЕМ.....	98
В.Д. Булаев, С.Л. Лысенко, В.Г. Прокошев ИССЛЕДОВАНИЕ БЕЗГЕЛИЕВЫХ СМЕСЕЙ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОИОНИЗАЦИОННЫХ CO ₂ ЛАЗЕРОВ.....	103
А.Ю. Абаляев, В.М. Басуров, В.Ф. Гуськов ВЛИЯНИЕ НАНОКОМПОЗИЦИОННОЙ ПРИСАДКИ MG/MO ₃ К ТОПЛИВУ НА РАБОЧИЙ ЦИКЛ ДИЗЕЛЯ.....	105

В.В. Дорожков, Л.В. Фуров, В.Н. Конешов, АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СЕЙСМОСТАНЦИЯ «ВЛАДИМИР» НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ ПОЛИГОНЕ ВЛГУ.....	107
И.Н. Кузьмин, И.М. Мамаев, К.В. Рябов, Р.Ю. Тутубалин, В.Н. Филимонов ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРИВОДЫ ДЛЯ НАНОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ.....	112
Т.С. Шуткина ЕДИНСТВЕННОСТЬ ЦИКЛА С ДИСКОНТИРОВАНИЕМ ПО ДОХОДУ И ПРИЛАГАЕМЫМ УСИЛИЯМ, ОПТИМАЛЬНОГО ПО СРЕДНЕЙ ВРЕМЕННОЙ ВЫГОДЕ.....	115
О.И. Трубина О СКОРОСТИ СХОДИМОСТИ ПРИ АППРОКСИМАЦИИ МНОГОГРАННИКАМИ ВЫПУКЛОЙ ПОВЕРХНОСТИ.....	119
С ЗАДАННОЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ КРИВИЗНОЙ	
Д.В. Абрамов, С.А. Маков, И.М. Логинова, В.Г. Прокошев ФОРМИРОВАНИЕ НИТЕВИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ ОКСИДА ЦИНКА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВО ВНЕШНЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ.....	122
О.Р. Никитин, А.Н. Данилов, В.В. Яковлев МИКРОВОЛНОВЫЙ РАДИОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД РАННЕГО ОБНАРУЖЕНИЯ НОВООБРАЗОВАНИЙ В БИООБЪЕКТАХ.....	125
О. Р. Никитин, М. Ю. Грехов ПАССИВНЫЙ МИКРОВОЛНОВЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ.....	129
Чинь Тхи Зиен Линь О НОРМАЛЬНЫХ ФОРМАХ СЕМЕЙСТВ УРАВНЕНИЙ СМЕШАННОГО ТИПА НА ПЛОСКОСТИ.....	133

О.Н. Большакова, Д.С. Ногтев, О.Б. Телушко, К.С. Хорьков, М.Н. Герке,
В.Г. Прокошев, С.М. Аракелян
Владимирский государственный университет

ФОРМИРОВАНИЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ В ВАКУУМЕ

Работа посвящена экспериментальному изучению наноструктур, возникающих при фемтосекундной лазерной абляции на подложке. Исследования, проведенные с помощью атомно-силовой и электронно-растровой микроскопии, показывают, что область осаждения состоит из нескольких зон, имеющих свою структуру, каждая из которых характеризуется своим масштабом сформированных наноструктур. Получены наноструктурированные плёнки никеля, титана и углерода с минимальными характерными размерами наноструктур порядка 30 нм. Выявлен эффект микроструктурирования полученного напыления титанов в атмосферном воздухе.

Введение

Данная работа посвящена экспериментальному изучению наноструктур, возникающих при лазерной абляции массивных металлических и углеродных мишеней и осаждении продуктов абляции на подложке.

Геометрия нашего эксперимента аналогична схеме, предложенной в работе [1]. Однако в наших экспериментах излучение фемтосекундной Ti:Sapphire лазерной системы (рис. 1) имело несколько другие параметры: частота повторения импульсов $f_{\text{rep}}=1$ кГц, длительность $T_{\text{pulse}}=50$ фс, энергия $E_{\text{pulse}}=1$ мДж и фокусировалось одиночной линзой на поверхность мишени, находящейся в вакуумной камере (рис. 2). Диаметр пятна сфокусированного излучения составлял 250 мкм. Камера откачивалась турбомолекулярной насосной станцией до давления $p=10^{-4}$ Торр (рис. 3).

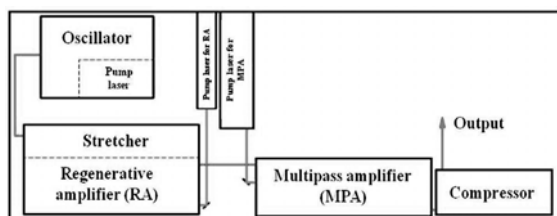


Рис. 1. Схема фемтосекундной Ti:Sapphire лазерной системы

Методика эксперимента

Сфокусированное лазерное излучение попадает на мишень, расположенную под углом 45° к нему. Под действием мощного фемтосекундного излучения на поверхности мишени образуется факел. Пары материала мишени разлетаются в объеме вакуумной камеры и оседают на холодную подложку. В нашей системе мы использовали автокорреляционный метод и метод спектральной фазовой интерферометрии для контроля продолжительности лазерного импульса. Таким образом, измерения двумя независимыми методами позволяют контролировать продолжительность лазерного импульса и регулировать систему при необходимости.

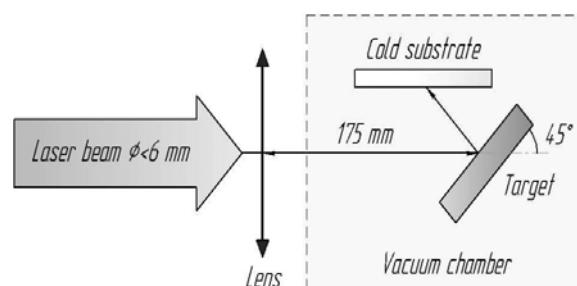


Рис. 2. Геометрия эксперимента

В зависимости от регулируемых параметров эксперимента на подложке формируются достаточно сложные наноструктуры [2].

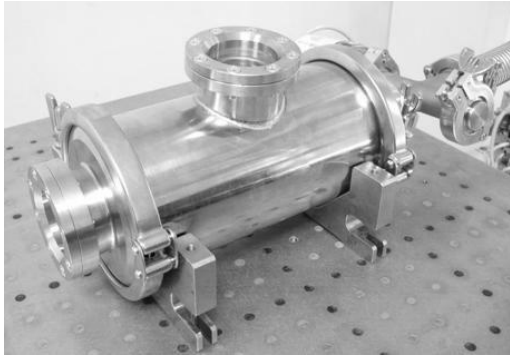


Рис. 3. Общий вид вакуумной камеры (длина 274 мм и диаметр 108 мм)

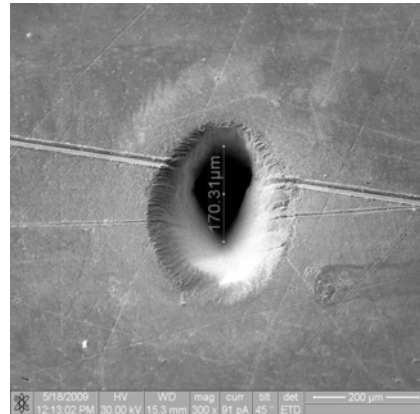
За время действия фемтосекундного лазерного импульса не происходит плавления вещества мишени в отличие от пикосекундных и наносекундных импульсов. Поэтому абляцию в случае использования фемтосекундных импульсов можно рассматривать как очень быстрый переход твердое тело – пар. В процессе абляции возникает адиабатическое расширение вещества. Этот процесс происходит за время порядка 1 нс. При этом пары вещества охлаждаются до температуры конденсации, образуется смесь жидкости и пара, в которой возможны процессы образования наночастиц. Термодинамические условия образования наночастиц подбирались экспериментально, варьируя параметры лазерных импульсов, частоту повторения, а также расстояние от мишени до подложки. Пары материала мишени разлетаются в объеме вакуумной камеры и оседают на холодную подложку. В зависимости от регулируемых параметров эксперимента на подложке формируются достаточно сложные наноструктуры.

Металлические мишени изготавливались из никеля и титана, а углеродные - из аморфного стеклоглерода. В качестве подложек использовались полированные пластины кварцевого стекла и кремния.

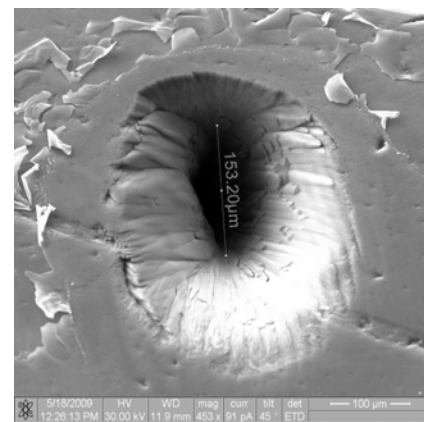
Результаты

В процессе воздействия на мишени образуются характерные кратеры, представленные на рис. 4. Время воздействия на мишени никеля составляло примерно 6 с. На подложке отчетливо видна зонная структура напыления (рис. 5). Напыленный материал

обладает малой адгезией к подложке и неустойчив к внешнему воздействию (рис. 6).

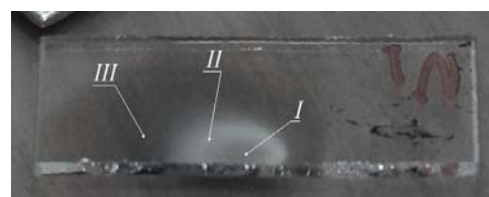


а)

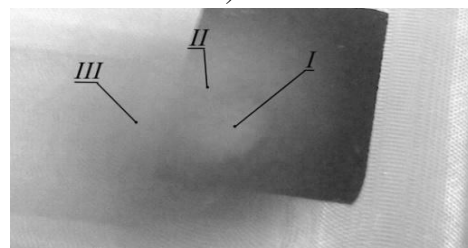


б)

Рис. 4. (а) Лазерная каверна на образце никеля, характерные размеры 170 мкм; (б) лазерная каверна на образце стеклоглерода, характерные размеры 153 мкм.

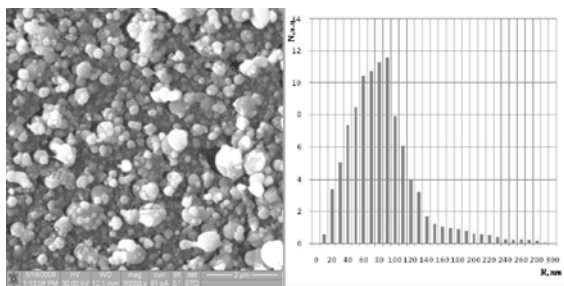


а)

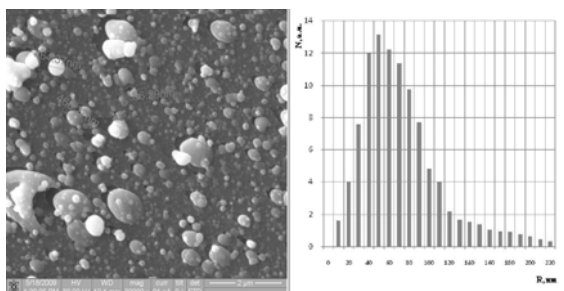


б)

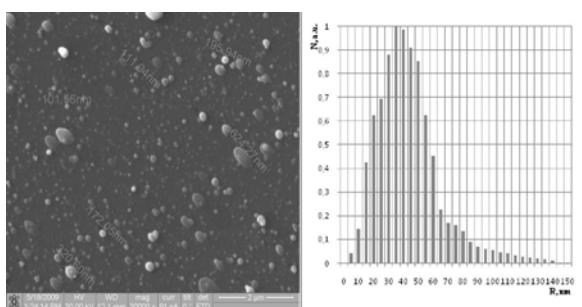
Рис. 5. Зонная структура напыления металлических мишеней (а) никель; (б) титан: I – центральная зона, II - средняя зона, III -краевая зона



а)



б)



в)

Рис. 6. РЭМ изображения напыления никеля и соответствующие распределения наночастиц: а – в центральной зоне I; б – средней зоне II; в – в краевой зоне III

При воздействии фемтосекундных лазерных импульсов на поверхности образцов никеля, титана и стеклоуглерода образуются характерные каверны порядка 250 нм в плоскости границы мишени и 150 нм в углублении. При воздействии на мишени никеля на подложке отчетливо видна зонная структура напыления. С помощью РЭМ изображений наночастиц никеля, которые оседают на поверхность подложки, можно выделить центральную, среднюю и краевую зоны. Напыленный материал обладает малой адгезией к подложке и неустойчив к внешнему воздействию. Центральная зона характеризуется большим количеством наноча-

стиц, приближенных к сферической форме, но имеющих неровные края.

Построены диаграммы распределения наночастиц по размерам. При этом размер наночастиц в данной области находится в пределах от 20 до 600 нм в диаметре. Наиболее часто встречающиеся наночастицы имеют размер 150 нм. Характерный размер частиц распределения напыления никеля в средней зоне преобладает в области 100 нм. Форма частиц – эллипсообразная. Встречаются наночастицы относительно большой формы, но распределение частиц менее 100 нм достаточно однородное. В краевой зоне наночастицы более разрежены, но имеют однородное распределение и средний размер порядка 70 нм.

Наночастицы с меньшим характерным размером порядка 17 нм были получены при воздействии лазерного излучения на поверхность титановой мишени. Получены типичные РЭМ изображения наночастиц, которые оседают на поверхность холодной подложки из кварцевого стекла (рис. 7).

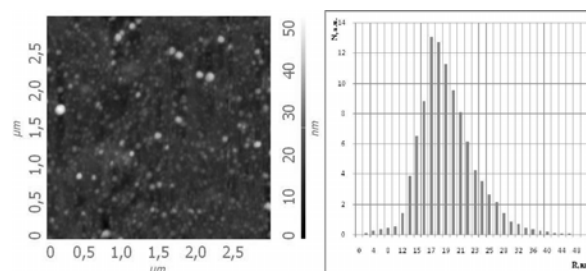


Рис. 7. АСМ изображение напыления титана и соответствующего распределения наночастиц

Наночастицы при воздействии лазерного излучения на титановую мишень получены при той же геометрии эксперимента, что и в экспериментах с мишенями из никеля. Форма наночастиц – сферическая. Распределение однородное, более сосредоточенное в центральной области и разреженное в краевой. Однако при некоторых условиях эксперимента слой наночастиц после опыта (в атмосферном воздухе) трансформировался (самоупорядочивался), образуя почти регулярные структуры. Главной особенностью образования тонких пленок титана на по-

верхности подложки является зависимость расстояния от образца до неё (рис. 8).

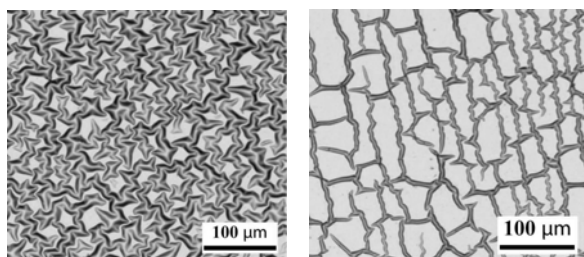


Рис. 8. Оптические изображения напыления титана в центральной и средней зонах

При анализе оптических изображений поверхности создается впечатление, что происходит образование микротрещин (рис. 8, 9).

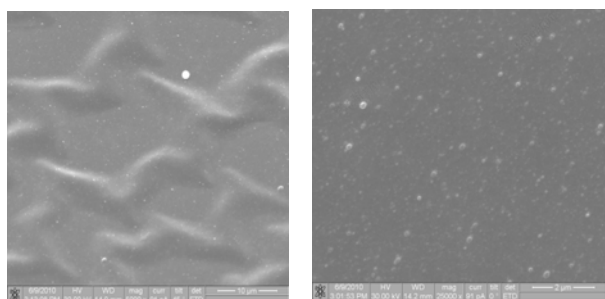


Рис. 9. РЭМ изображения напыления титана в центральной зоне

Данные "микротрещины" наиболее выражены в центральной области напыления и имеют упорядоченную структуру, но при удалении от центра число микротрещин уменьшается и остаётся лишь равномерное распределение наночастиц. Однако измерения, выполненные на зондовом микроскопе,

показали, что происходит образование достаточно острых выпуклостей (складок) на поверхности, которая представляет слой наночастиц (рис. 10). Данные складки имеют достаточно периодическую структуру.

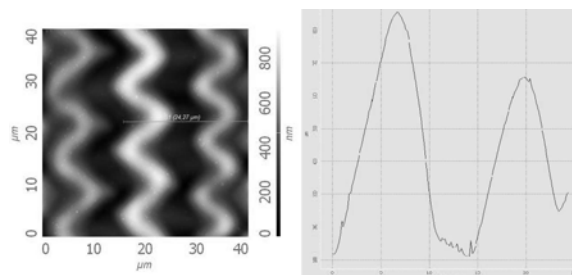


Рис. 10. Зонная структура напыления и распределение наночастиц по размеру титановой мишени

Также наноструктуры получены при абляции стеклоуглерода ультракороткими лазерными импульсами на поверхности подложки из кварцевого стекла. Получены наиболее типичные АСМ изображения, при этом главное отличие от аналогичных изображений для никеля и титана состоит в том, что для стеклоуглерода не образуются отдельные наночастицы, а происходит формирование наноструктур достаточно сложной формы (рис. 11).

На изображениях напыления стеклоуглерода можно видеть сложную лабиринтоподобную структуру нанотрубок с характерным поперечным размером 10 нм и кольцевые структуры диаметром порядка 30 нм, высота структур 15 нм, что согласуется с исследованиями других авторов и более ранними работами.

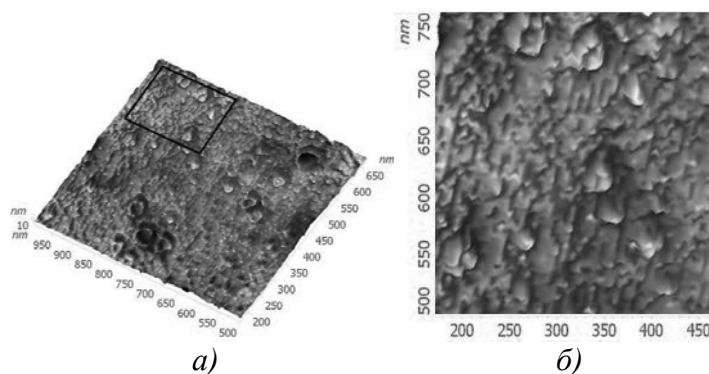


Рис. 11. (а) АСМ изображение наноструктурированных пленок стеклоуглерода; (б) увеличенная выделенная область

Выводы

Исследования, проведенные с помощью атомно-силового и электронно-растрового микроскопов, показывают, что область осаждения углеродных и металлических мишеней под воздействием фемтосекундных лазерных импульсов состоит из нескольких зон, имеющих свою структуру, каждая из которых характеризуется своим масштабом сформированных наноструктур. Для металлов различаются центральная, средняя и краевая зоны. Можно предположить, что это объясняется интенсивным взаимодействием наночастиц титана с атмосферным кислородом с образованием окисла TiO_2 и самоорганизацией наночастиц в процессе такого взаимодействия. Однако более детальное понимание физического механизма микроструктурирования поверхности напыленного в атмосферном воздухе слоя титана требует дальнейших экспериментальных исследований.

Исследование и дальнейшее внедрение методики фемтосекундного лазерного воздействия на различные образцы металлов, полупроводников, углеродосодержащих материалов и последующего напыления на подложки наноструктурированных частиц, возникающих в результате лазерной абляции, как в обычных условиях, так и в вакууме, является актуальной, не изученной до конца областью применения лазеров такой короткой длительностью.

Работа проведена при финансовой поддержке Министерства образования и науки

РФ в рамках федеральной целевой про-

граммы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России».

Библиографический список

1. S. Eliezer, N. Eliaz, E. Grossman, D. Fisher, I. Gouzman, Z. Henis, S. Pecker, Y. Horovitz, M. Fraenkel, S. Maman, V. Ezersky, and D. Eliezar, *Nanoparticles and nanotubes induced by femtosecond lasers* (2005) 15.
2. D.V. Abramov, M.N. Gerke, A.O. Kucherik, S.V. Kutrovskaya, V.G. Prokoshev and S.M. Arakelian, *Quantum Electronics* 37 №11 (2007) 1051.
- 3 D.V. Abramov, S.M. Arakelian, A.F. Galkin, I.I. Klimovsky, A.O. Kucherik and V.G. Prokoshev, *Nano- and Microsystem Techiques* №4 (2007) 39.
4. Герке М. Н. Формирование углеродных субмикронных и наноструктур на поверхности холодной подложки при воздействии лазерного излучения на поверхность углеродосодержащих материалов в атмосферном воздухе / М.Н. Герке[и др.] // *Квантовая электроника*. – 2008. – Т. 37. – № 1. – С. 73-76.
5. Bonse J., Baudach S., Kruger J., Kautek W., Lenzner M. Femtosecond laser ablation of silicon-modification thresholds and morphology. *Applied Physics A: Materials Science & Processing*. 2002. Т. 74. № 1. С. 19-25.
6. Анисимов С.И. Обзоры актуальных проблем. Избранные задачи теории лазерной абляции / С.И. Анисимов, Б.С. Лукьянчук // *УФН*. – 2002. – Т. 172. - № 3. С. 301-333.

А.Ф. Галкин, М.Н. Герке, С.В. Жирнова, Е.Л. Шаманская
Владимирский государственный университет

ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ СТРУКТУРЫ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ СО СТЕКЛОУГЛЕРОДОМ

В работе проведены экспериментальные исследования по воздействию фемтосекундного лазерного излучения на поверхность углеродосодержащих материалов. Установлено, что при воздействии излучения фемтосекундной лазерной системы на стеклоуглерод на его поверхности образуются структуры, периодичность которых определяется частотой следования импульсов и скоростью движения координатного столика. На поверхности расплава стеклоуглерода обнаружены гидродинамические волны, в результате интерференции которых образуются интерференционные поверхностные периодические структуры.

Введение

Интерес к формированию лазерными импульсами поверхностных структур вызван практическим применением разработки и созданием элементов микросистемной техники, возможностью изменять поглощательную и отражательную способность среды, изменение возможности сращиваться с биологическими тканями и др. [1].

Исследования в этом направлении показывают, что на форму и пространственный период получаемых структур влияет ряд факторов: число импульсов излучения, интенсивность излучения, поляризация лазерного излучения, первоначальная шероховатость поверхности [2], род вещества. Так, например, в работе [3] получено, что период структуры GaN сапфир до 40 импульсов не зависит от числа импульсов. В работе [4] при количестве импульсов больше 200 пространственный период нанорельефа на поверхности металла скачкообразно уменьшается в два раза. При уменьшении интенсивности излучения от 3,7 до 0,8 Дж/см² [3] период структур уменьшается от 703 до 235 нм. Ориентация поверхностных структур может зависеть от поляризации излучения, причем ориентация структур может быть как перпендикулярна полю волны [5], так и параллельна [1]. Для разных полупро-

водников (GaP, InP, InAs, Si) получают разные периоды [5]. Кроме того, на рельеф поверхности оказывает влияние интерференция падающей волны с поверхностными плазмон-поляритонами.

Интерес к стеклоуглероду обусловлен его широким применением в науке, технологии, медицине благодаря особым свойствам. Стеклоуглерод – изотропный газонепроницаемый, твердый и прочный материал, сочетающий свойства графита и стекла, способный выдерживать быстрый многократный нагрев с последующим быстрым охлаждением. Стеклоуглерод применяется в виде технологической оснастки в высокоагрессивных средах, в производстве полупроводниковых материалов, в электрокардиостимуляторах, так как обладает хорошей биологической совместимостью с живыми тканями.

Экспериментальная установка

Мишень, в качестве которой использовался образец стеклоуглерода с содержанием углерода 99,9 %, подвергалась воздействию сфокусированного луча фемтосекундной лазерной установки. Основные характеристики ФЛ (в наших экспериментах): длина волны излучения 800 нм, частота повторения импульсов 100 Гц, длительность 60 фс,

энергия в импульсе ~ 10 мДж, средняя мощность излучения изменялась в диапазоне 750÷850 мВт.

Усилитель яркости на парах меди CVL-10 позволял получить оптические изображения области лазерного воздействия до 16000 изображений в секунду с экспозицией до 20 нс. Для регистрации изображений установлен 1,3 мегапиксельный матричный CMOS-сенсор, что позволило обеспечить ввод изображений со скоростью 5000 кадров в секунду. Плата контроллера VS 2001 позволила обеспечить передачу информации в виде последовательности кадров с разрешением 1280x1024 пикселей в компьютер при последующей обработке и анализе.

Результаты эксперимента. Формирование поверхностных структур

На рис. 1 представлен отдельный кадр видеозаписи воздействия фемтосекундного лазерного излучения на образец стеклоуглерода при горизонтальном движении предметного столика относительно лазерного луча, относящиеся к различным моментам времени. Скорость движения столика 1 мм/с.

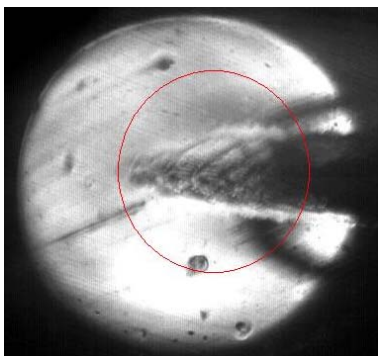


Рис. 1. Воздействие фемтосекундного лазерного излучения на стеклоуглерод в движении

Светлое пятно на кадрах – это пятно подсветки лазерного усилителя на парах меди. Темное пятно справа – область воздействия фемтосекундного лазерного излучения до начала движения координатного столика, левее – структурная область, получающаяся при движении столика. Кольцеобразная область образовалась до движения столика.

Форма периодической структуры определяется формой лазерного пятна, а именно, его передней части по отношению к направлению движения луча относительно мишени. (на рис. 1 луч относительно мишени как бы движется справа налево). Изменяя частоту следования импульсов, форму лазерного пятна и скорость координатного, столика можно сформировать нужную поверхностную структуру.

Шаг периодической структуры порядка 0,01 мм при скорости столика 1 мм/с, что соответствует частоте 100 Гц, отсюда можно сделать вывод о том, что периодичность структурной области определяется частотой следования импульсов ФЛ и скоростью луча относительно мишени.

Другим способом формирования поверхностных структур является интерференционный. На поверхности расплава стеклоуглерода при движении мишени относительно лазерного луча образуется интерференционная структура. На рис. 2 представлена интерференционная картина, полученная с помощью электронного микроскопа Quanta-700-3D с увеличением $800\times$. Период структуры ~ 5 мкм. При ещё большем увеличении обнаружено, что интерференционные области состоят из наноструктур размером 70-100 нм.

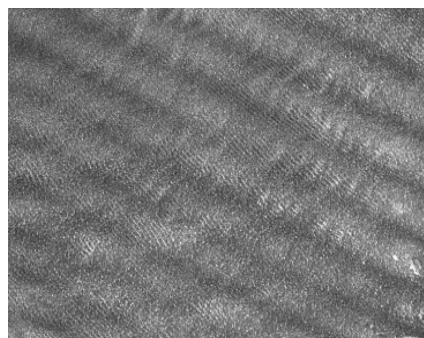


Рис. 2. Поверхность стеклоуглерода после воздействия лазерного излучения

При неподвижном положении мишени исследовались зависимости периода структур на поверхности стеклоуглерода от длительности воздействия (количества импульсов). Получена немонотонная зависимость с

отличием на порядок (от 2 до 20 мкм). Отметим, что кроме стеклоуглерода периодические структуры также получены на поверхности кремния и титана. Эти материалы предполагают отдельное рассмотрение.

Выводы

Установлено, что при воздействии фемтосекундной лазерной системы на стеклоуглерод на его поверхности образуются структуры, периодичность которых определяется частотой следования импульсов и скоростью движения координатного столика. Форма структур зависит от формы передней части лазерного пятна в направлении движения луча относительно мишени.

На поверхности расплава стеклоуглерода обнаружены гидродинамические волны, в результате интерференции которых образуются интерференционные поверхностные периодические структуры, которые состоят из наноструктур размером 70-100 нм.

Библиографический список

1. Макин, В.С. Упорядоченное наност-

руктурирование полупроводников фемтосекундным излучением / В.С. Макин // Фотоника. – 2009. – № 2, – С. 16 - 20.

2. Takuro Tomita, Keita Kinoshita, Shigeki Matsuo and Shuichi Hashimoto : Effect of surface roughening on femtosecond laser-induced ripple structures, Applied Physics Letters, Vol.90, No.15, pp.153115-1-153115-3, 2007.

3. Wang X., Lim G. Subwavelength periodic ripples formation on GaN surface by femtosecond laser pulses. – Surface Review and Lett., 2005, v.12.

4. Макин, В.С. Макин, Р.С. Воробьев А.Я., Чунлей Гуо. Диссипативные наноструктуры и универсальность Фейгенбаума в неравновесной нелинейной динамической системе металл – мощное поляризованное ультракороткое импульсное излучение // Письма в ЖТФ. – 2008. Т. 34; вып. 9. – С. 55 – 64.

5. Borowiec A., Haugen H. Subwavelength ripple formation on the surface of compound semiconductors irradiated with femtosecond laser pulses.– Appl. Phys. Lett., 2003, v.42.

В.В. Ионин, Д. Ю. Павлов, Н.Н. Давыдов

Владимирский государственный университет

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ НАНООТВЕРСТИЙ КОРОТКО-ИМПУЛЬСНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Проведены экспериментальные исследования по формированию отверстий нанометрового диаметра. Установлены зависимости протекающих процессов и результатов воздействия излучения от параметров лазерного излучения и окружающей среды

«Необыкновенный эффект пропускания» [1] лазерного излучения (ЛИ) через нанотверстия приводит к значительным изменениям параметров и характеристик электромагнитного поля и его локализации в малых объемах. Эффект является «многообещающим» в нелинейных оптических системах при решении задач повышения «качества» методов инфракрасной и рамановской спектроскопии. Данное явление используется как в оптике ближнего поля, так и в оптоэлектронике для ускорения процессов регистрации сигналов и повышения эффективности источников излучения и фотоэлементов.

Известны различные методы создания микроскопических отверстий в материалах:

- сверление алмазным сверлом или коронкой;
- сверление ультразвуком с абразивом;
- электроэрозионный метод;
- прошивка излучением CO₂ или рубинового лазера.

Перечисленные методы обладают вполне определенными преимуществами и являются оптимальными при обработке ряда конструкционных материалов. Тем не менее, их применение для создания нанотверстий имеет существенные ограничения, такие как

растрескивание, оплавление и изменение доменной структуры материала, значительный расход режущего инструмента, необходимость использования вспомогательных жидких компонент и специальных растворов.

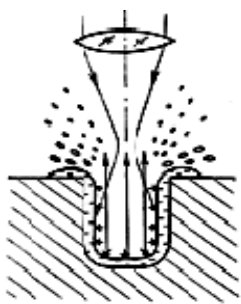


Рис. 1. Схематическая диаграмма микроформообразования [2]

При создании отверстий с диаметрами порядка 100 нм предлагается использовать импульсный иттербиевый волоконный лазер (рис. 1):

- средняя мощность 10 Вт;
- частота следования импульсов 20–100 ГГц;
- длительность импульса $\approx 180 - 200$ нс;
- длина волны излучения 1.06...1.07 мкм.

Результаты исследований [2,3] предопределили перспективность использования короткоимпульсных систем при введении в схему эксперимента дополнительных технологических материалов, таких как жидкости.

Схема разработанной экспериментальной установки приведена на рис. 2.

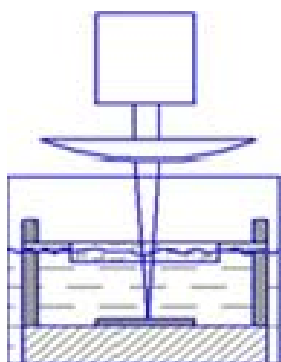


Рис. 2. Схема эксперимента в жидкостной кювете

На рис. 3 схематично представлены результаты экспериментальных исследова-

ний в воздушной (а) и жидкой (б) средах. При уменьшении длительности импульса ЛИ снижается объём аблированных частиц (рис. 1, 4), однако при этом существенно возрастает стоимость необходимого технологического оборудования и проявляется нестабильность формы отверстий (рис. 5).

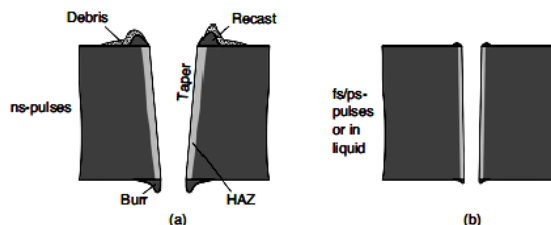


Рис. 3. Качество лазерной резки в металле на воздухе (а) и при наличии жидкости / вакуума (б) (схематично) [3]

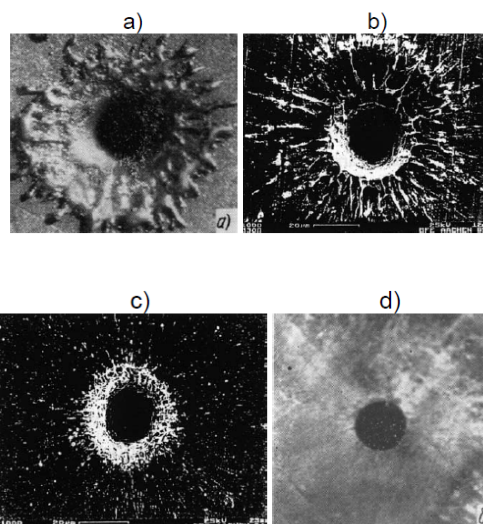


Рис. 4. Общий вид «лазерных» отверстий [2]. Длительность импульса: а) \sim мс, б) \sim мкс, с) \sim нс, д) \sim фс

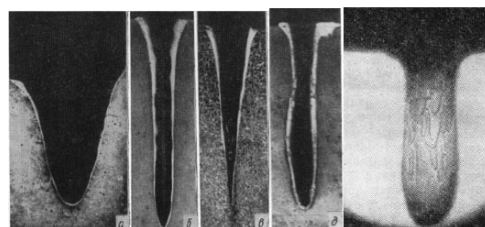


Рис. 5. Продольный вид «лазерных» отверстий [2] (глубина ~ 1 мм)

На рис. 6 представлены результаты создания отверстий в материале, находящемся в жидкой среде импульсным ЛИ нанометрового диапазона.

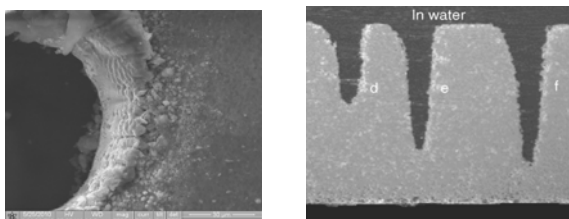


Рис. 6. Поверхность образца и продольный вид отверстий

Геометрия канала близка к конической форме и внутри отсутствуют следы расплава и аблированных частиц. На поверхности наличие расплава и аблированных частиц несущественно, что предопределено конвекционными потоками (рис. 7) в канале и отсутствием условий для образования плазменного факела и пробоя воздуха.

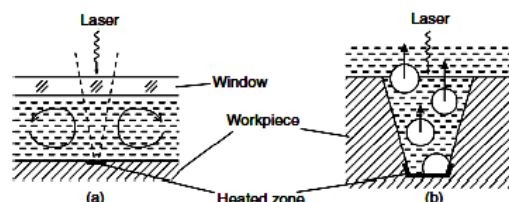


Рис. 7. Тепловая и пузырьковая конвекция в жидкости в области воздействия лазерного луча [3]

Исследования показали, что приемлемое

Д.В. Абрамов, С.В. Жирнова, И.М. Логинова, С.А. Маков, В.Г. Прокошев
Владимирский государственный университет

ФОРМИРОВАНИЕ МИКРО- И НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МАССИВОВ КРИСТАЛЛОВ ОКСИДА ЦИНКА ПРИ ЛАЗЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Получены массивы кристаллов оксида при лазерном воздействии непрерывного лазерного излучения на образцы из цинкосодержащих медных сплавов. Лазерное воздействие осуществлялось в присутствии углеродных нанотрубок. Структуры, образующие массивы, имеют характерные размеры порядка 1 микрометра и меньше.

Введение

Нитевидные кристаллы, или вискеры, с момента обнаружения стали предметом пристального исследования. Изначально исследовались нитевидные кристаллы металлов, и основное внимание уделялось их механической прочности. Было обнаружено, что вискеры обладают прочностью, в 1000 раз превосходящей прочность массивных образцов из того же материала [1]. Впоследствии была обнаружена возможность роста нитевидных

качества отверстий возникает при наносекундных длительностях импульса ЛИ. Это способствует повышению скорости формирования массива нанотверстий и обеспечивает экономическую доступность технологии, из-за отсутствия необходимости применения дорогостоящего лазерного оборудования с фемтосекундной длительностью ЛИ.

Библиографический список

1. Ahmet Ali Yanik, Xihua Wang, Shyam-sunder Erramilli, Mi K. Hong, and Hatice Altug, – Extraordinary midinfrared transmission of rectangular coaxial nanoaperture arrays, – Appl. Phys. Lett. 93, 081104 (2008); DOI:10.1063/1.2973165.
2. Вейко, В. П. Опорный конспект лекций по курсу «Физико-технические основы лазерных технологий». Раздел: Лазерная микрообработка / В.П. Вейко – СПб: СПбГУ ИТМО. – 2005. – 110 с.
3. Arvi Krusing. - Handbook of Liquids-Assisted Laser Processing. - Elsevier Science. – 2007. – 464 с.

кристаллов химических соединений кристаллов, например их оксидов, которые образуются в ходе реакций металла формирующегося вискера с элементами окружающей его газовой среды. В этом случае удается получать полупроводниковые кристаллы, обладающие рядом специфических свойств, которые определяют перспективность получаемых материалов для многих прикладных применений. Например, оксид цинка может быть применен для фотокаталитической

очистки сред в качестве пьезоэлектрического материала в виде лазерной активной среды и др.

Существуют различные методы получения данного материала: гидротермальный, микроэмульсионный, молекулярно-лучевой эпитаксии, электронно-лучевого испарения, лазерного испарения. В последнем методе ярко реализуется механизм «пар – жидкость – кристалл» [2]. При данном механизме адсорбция компонентов вискера из газовой фазы происходит преимущественно в капле жидкости на конце растущего кристалла. Пересыщение жидкой фазы по отношению к компонентам вискера приводит к их кристаллизации на границе раздела твердой и жидкой фаз и однонаправленному росту кристалла. Диаметр кристалла соответствует размеру капли-затравки на поверхности подложки.

Метод лазерного испарения благодаря своей гибкости и пространственной избирательности наиболее перспективен для получения структурированных слоев оксида цинка на поверхности готовых изделий. В настоящей работе рассматриваются результаты формирования микро- и наноструктурированных массивов кристаллов оксида цинка при лазерном воздействии на поверхность латуни, которая является одним из наиболее распространенных современных промышленных сплавов.

Результаты эксперимента

В качестве материала мишени для экспериментального исследования роста кристаллов оксида цинка при лазерном воздействии была выбрана латунь ЛС59-2. Данный сплав имеет достаточно сложный состав (Cu – 57,0-59,0 %, Pb – 1,5-2,5 %, Fe – 0,4%, Sn – 0,3 %, Ni – 0,4 %, Al – 0,1 %, Zn – 37,1 %, прочих элементов до 0,2 %), но основным компонентом после меди является цинк. Именно он должен стать источником образования капель-затравок, необходимых для роста кристаллов. Воздействие на поверхность латуни лазерным излучением осуществлялось в присутствии углеродных нанотрубок (УНТ).

Условия эксперимента были следующие. Лазерное излучение иттербиевого волокон-

ного лазера непрерывного действия ЛС-02 мощностью 30 Вт фокусировалось на поверхность мишени из латуни объективом с фокусным расстоянием 5 см в пятно диаметром 0,1 мм. Плотность мощности лазерного излучения на поверхности латуни имела порядок 10^5 Вт/см². Поверхность мишени не подвергалась предварительной подготовке. На поверхность мишени наносился слой многостенных углеродных нанотрубок толщиной 0,5 мм. Лазерное воздействие длилось 10 с. При таких условиях воздействия расплавления меди (основного материала латуни) не происходило. Цинк как более легкоплавкий материал плавился, образуя капли-затравки для роста нитевидных кристаллов. Присутствие атмосферного кислорода при высокой температуре определяло протекание окислительной реакции, и на поверхности образцов формировались структуры оксида цинка.

Углеродные нанотрубки не претерпевали изменения и удалялись с поверхности латуни после окончания воздействия. На поверхности латуни оставался массив кристаллов оксида цинка, состоящий из нитевидных кристаллов, микропластин и друз. Полученные кристаллы имеют поперечные размеры от 0,1 до 10 мкм. Длина кристаллов достигает величины 100 мкм.

Структуры оксида цинка исследовались с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) Quanta 200 3D. Исследования выявили широкий спектр полученных структур.

Рассмотрим наиболее характерные из полученных структур. На рис. 1 и 2 представлены структуры в виде правильных четырехлучевых звезд. Образование таких структур характерно для периферийных областей лазерного воздействия. Размер таких структур до 1,5 мкм, длина лучей до 700 нм, диаметр описанной окружности луча до 350 нм. Поперечное сечение луча представляет правильный шестигранник. Следует отметить, что подобная форма поперечного сечения характерна для многих полученных структур. Общий характер роста структуры и форма поперечного сечения, по-видимому,

обусловлены кристаллической структурой оксида цинка.

Данные структуры достаточно плотно покрывают поверхность латунного образца в местах их компактного образования. В направлении к центру лазерного воздействия структуры увеличиваются в размерах и пересекаются, а их форма становится менее идеальна (рис. 3 и 4). Структуры приобретают форму многолучевых друз. Плотность заполнения слоя оксида увеличивается, сохраняя сильно разветвленную структуру.



Рис. 1. РЭМ изображение массива структур в виде правильных четырехлучевых звезд

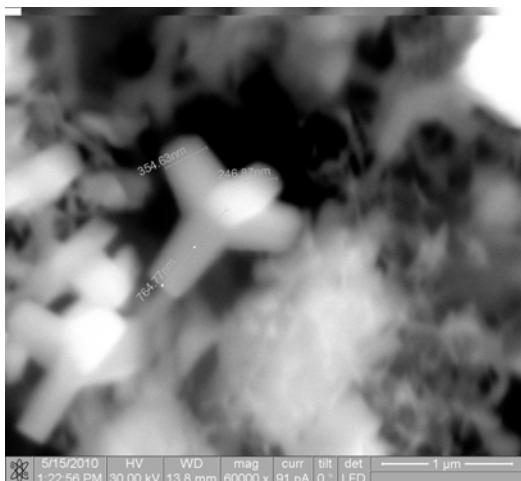


Рис. 2. РЭМ изображение отдельных структур в виде правильных четырехлучевых звезд

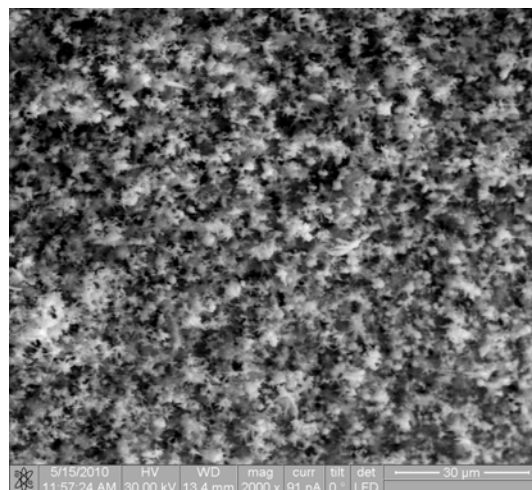


Рис. 3. РЭМ изображение массива структур в виде многолучевых друз

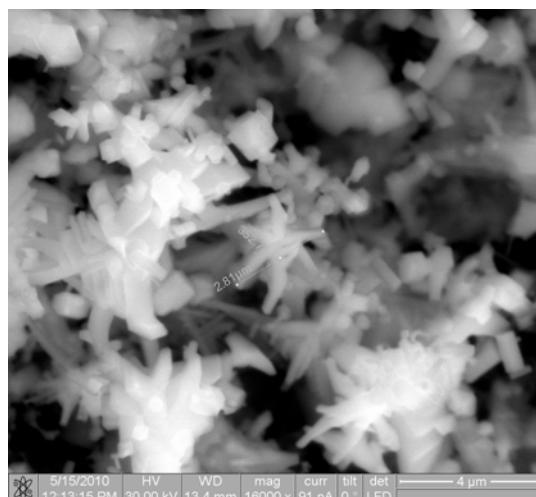


Рис. 4. РЭМ изображение отдельных структур в виде многолучевых друз

Дальнейшее разрастание структур оксида цинка приводит к формированию структур типа пластинчатых друз (рис. 5 и 6). Высокая плотность таких образований при сохранении развитой свободной поверхности делает их наиболее перспективными с точки зрения использования для фотокаталитических самоочищающихся покрытий. Толщина пластин не превышает 200 нм (рис. 7). По-видимому, с точки зрения прочности они уступают образованиям в виде лучевых друз.

Интересны края пластин рассматриваемых образований. Они представляют периодические стержневые структуры со средними размерами 150 нм и периодом 300 нм (рис. 8).

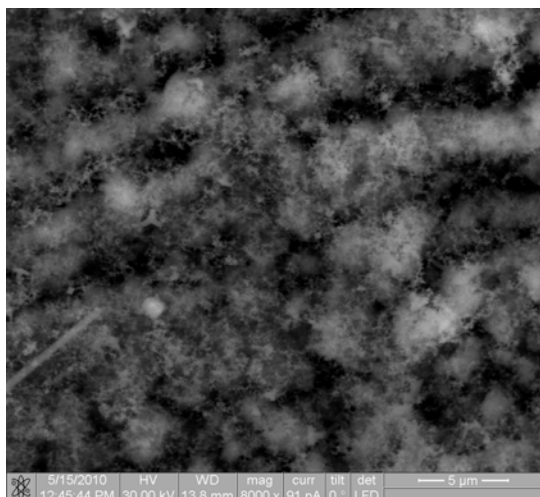


Рис. 5. РЭМ изображение массива структур в виде пластинчатых друз

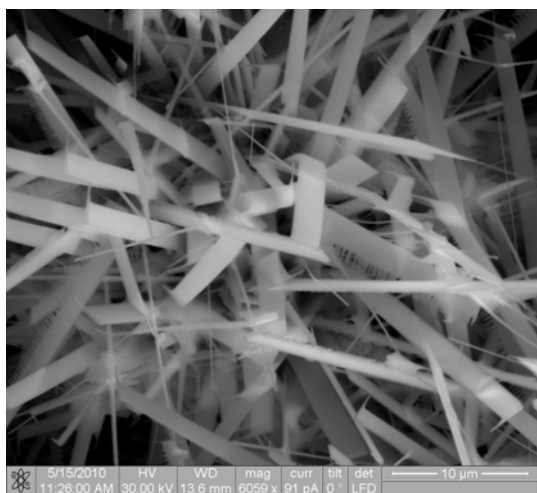


Рис. 6. РЭМ изображение отдельных структур в виде пластинчатых друз

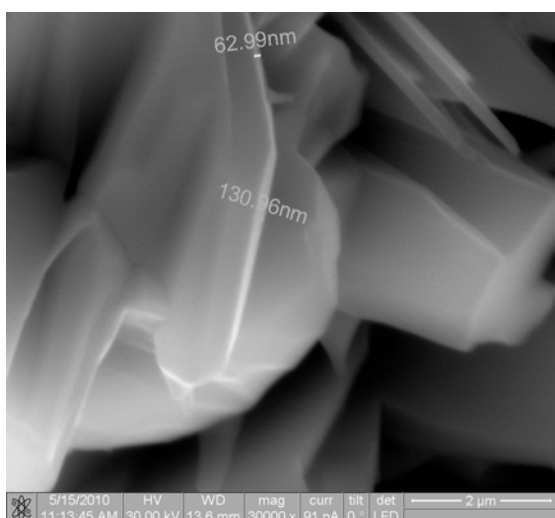


Рис. 7. РЭМ изображение пластины из оксида цинка

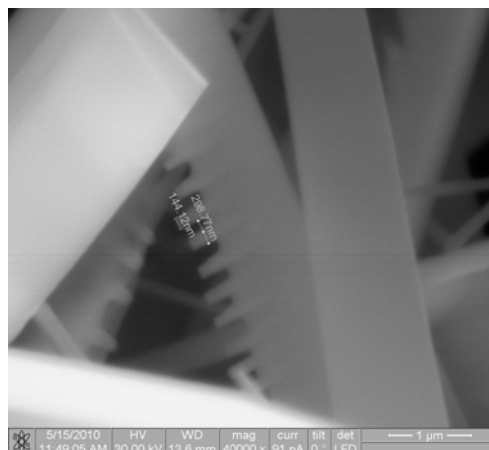


Рис. 8. РЭМ изображение стержневой структуры края пластины из оксида цинка

В центре области воздействия отмечено изменение характера роста структур оксида цинка. Зарегистрировано формирование длинных стержней оксида цинка (рис. 9). Поперечное сечение стержней сохраняет форму правильного шестигранника. Средний поперечный размер стержней имеет порядок единиц микрометров, но встречаются и наностержни. Стержни могут ветвиться с образованием листьев и их пучков. Пучки образованы как набором стержней, так и пластин (рис. 10).

Очевидно, такие образования оксида цинка имеют высокую хрупкость и не могут рассматриваться как защитные покрытия. Интересен факт образования монокристаллических стержней оксида цинка в направлении изучения их люминесцентных свойств. Кроме уже рассмотренных тонких стержней, на поверхности образцов выявлены области формирования более масштабных образований (рис. 11).



Рис. 9. РЭМ изображение стержней из оксида цинка

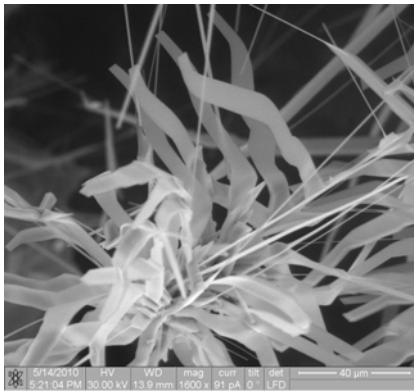


Рис. 10. РЭМ изображение пластин на стержне из оксида цинка

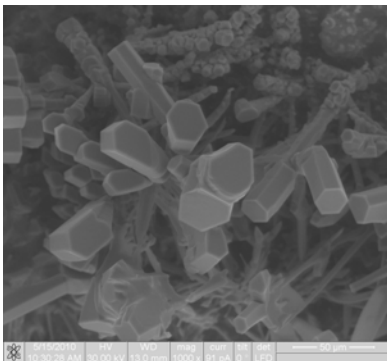
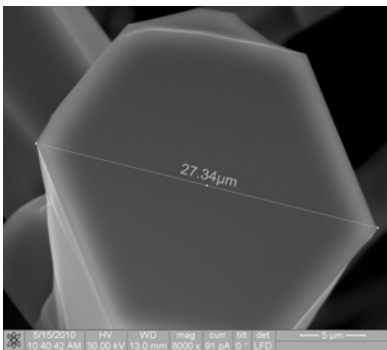
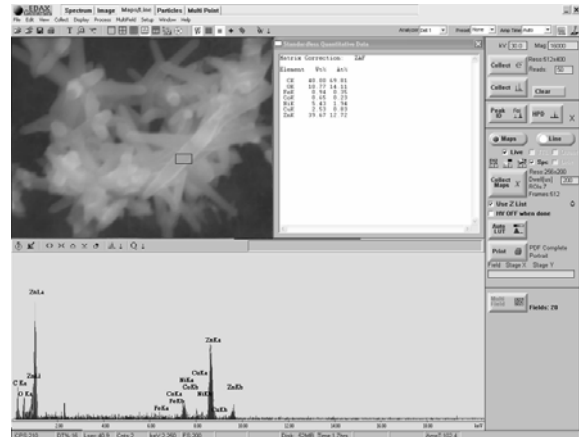


Рис. 11. РЭМ изображения крупных образований из оксида цинка

Для проверки состава формируемых при лазерном воздействии структур был проведен элементный рентгеновский анализ при помощи блока EDAX растрового электронного микроскопа Quanta 200 3D. Результаты анализа приведены на рис. 12. Они подтверждают формирование рассмотренных выше структур из оксида цинка. В измеренном спектре имеют место слабые линии и других элементов. По-видимому, они присутствуют как загрязнения, так как используемая в экспериментах латунь LC59-2 имеет достаточно сложный состав.



АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ИЗМЕРЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКИХ МИКРО- И НАНОПАРАМЕТРОВ ОБОСОБЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Представлен анализ объектов контроля с разделением на группы сложности. Также дается пример реализации автоматизированного контрольного блока обособленного объекта на примере железнодорожного полотна

Усложнение и повышение требований к дорогостоящим и стратегически важным объектам предопределяет повышенные требования к их эксплуатации. Такими объектами могут быть мосты, трубопроводы, железобетонные конструкции, самолеты, суда, нефтяные платформы и др. Разрушение или повреждение таких объектов могут привести к крупным катастрофам или гибели множества людей. В этих условиях руководством некоторых компаний, эксплуатирующих подобные объекты, приняты решения об усилении контроля над их состоянием [1-3]. Одним из возможных решений данной проблемы может быть создание системы мониторинга состояния объекта в режиме реального времени [4, 5].

Цель работы – исследование методов и средств контроля труднодоступных объектов.

Дать определение понятию обособленные объекты, применяя известные теории. Предложить методы и/или средства для мониторинга обособленных объектов.

В технике известны АСУ и контроля уже несколько десятков лет [6] и применяются для работы с различными объектами: промышленным оборудованием, ядерными реакторами, самолетами, крупными судами, подводными лодками, автомобилями и др. Но все эти объекты или их отдельные части находятся в разных условиях и требуют различного подхода к мониторингу их состояния или управления.

Исследуемая тема касается только труднодоступных, или по-другому *обособленных*

объектов (рис. 1). Для описания обособленных объектов целесообразно применить теорию информации [7]. Теория информации предполагает модель описания состояния объектов как взаимодействие *объекта* и *субъекта* через *среду*. Объект – то на что направлено действие. Субъект – то, что действует на объект. Среда – система объектов и условий, характеризующаяся определенными параметрами.

Обособленные объекты – объекты, на которые необходимо воздействовать системой мониторинга (субъектом) для получения данных о состоянии объекта в условиях (среде), сложных для осуществления действий контроля и диагностики.

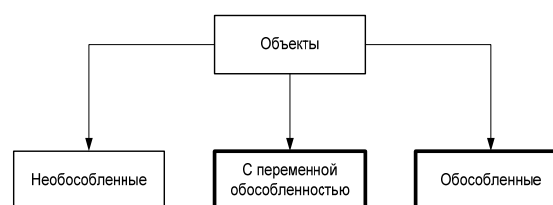


Рис. 1. Классификация объектов по сложности контроля

Характеристики таких объектов непостоянны и могут изменяться во времени. Следовательно, целесообразно выделить среднюю группу объектов – объекты с переменной обособленностью. Примером такой ситуации является контроль буксы колеса (объект) железнодорожных вагонов во время движения подвижного состава [8]. В этой ситуации среда, сложная для осуществления контроля, характеризуется такими параметрами, как скорость поезда, скорость вращения колеса, изменение расстояния до стан-

ции, отсутствие источников электрической энергии на товарных железнодорожных вагонах.

Проект системы диагностики и средств контроля обособленных объектов был реализован в рамках дипломного проекта выпускной квалификационной работы специалиста кафедры КТРС ВлГУ «Устройство контроля и сбора информации с рельсового полотна». Общая структурная схема для мониторинга состояния железнодорожного полотна может быть представлена в виде рис. 2.

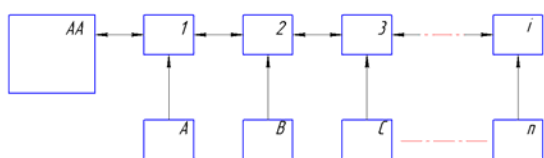


Рис. 2 - Структурная схема автоматизированной системы контроля протяженных обособленных объектов

Блоки А, В, С...n – устройства контроля, работающие вблизи контролирующего объекта. Устройство контроля входит в состав конструкции железобетонной шпалы или стационарных элементов строительных объектов [9].

Блоки 1, 2, 3... i – устройства приема и передачи информации, которые осуществляют сбор информации с устройств контроля и ретрансляцию полученной информации до блока АА, где АА – устройство приема и обработки информации.

Общий алгоритм работы системы состоит из нескольких шагов:

- получение данных устройством контроля с нанодатчиков;
- передача данных до ретранслятора;
- передача данных на устройство приема;
- анализ и принятие решения оператором системы.

Фрагмент из сборочного чертежа устройства контроля сбора и передачи информации представлен на рис. 3. Устройство контроля включает в себя автономный источник питания – магнитоэлектрический преобразователь механической энергии колебаний [10].

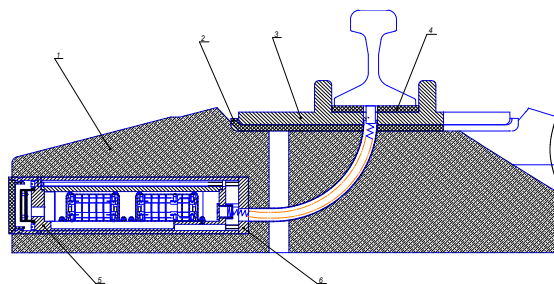


Рис. 3. Фрагмент сборочного чертежа на монтаж устройства контроля и сбора информации: 1 - шпала, 2 - резиновая прокладка, 3 - подкладка, 4 - резиновая прокладка под подошву рельса, 5 - устройство контроля сбора и передачи информации, 6 - кожух

Максимально конкретной, характеризующей все стороны объекта, теорией является теория информации. В процессе анализа удалось обнаружить непостоянность сложностей при диагностике и контроле обособленных объектов, что привело к введению термина *объекты с переменной обособленностью*. На подобную тематику одним из авторов в рамках дипломного проекта была разработана конструкция устройства контроля, входящая в состав железнодорожной шпалы, что позволяет сделать вывод о том, что задача по предложению средств контроля решена.

Библиографический список

1. Виноградов, С.А. Обеспечение безопасности объектов ЖАТ / С.А. Виноградов, А.С. Виноградов // Автоматика. Связь. Информатика. 2009. № 4. – С. 16-20.
2. Беспроводной датчик питается энергией вибраций / под общей ред. Ф.Ф. Пашенко // Датчики и системы 2010. № 7. – С. 60-61.
3. Датчики мониторинга состояния обшивки самолетов / под общей ред. Ф. Ф. Пашенко // Датчики и системы. 2010. №1. – С. 72.
4. Кнеллер, В.Ю. «Приборное облако» - концепция функционирования сенсорных систем на основе интернет-технологий / В. Ю. Кнеллер // Датчики и системы. – 2010. №8.– С. 66 - 69.
5. Беспроводные сенсорные сети // Свободная энциклопедия Википедия [Электронный ресурс]: URL : [http://ru.wikipedia.org/wiki/Беспроводные сенсорные сети#cite_note-1](http://ru.wikipedia.org/wiki/Беспроводные_сенсорные_сети#cite_note-1) (дата обращения: 15.11.10).

6. АСУ // Свободная энциклопедия Википедия [Электронный ресурс]. URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki/АСУ> (дата обращения: 19.11.10).

7. Янковский, С.А. Концепции общей теории информации // Электронная библиотека «Наука и техники» [Электронный ресурс]. URL: <http://n-t.ru/tp/ng/oti.htm> (дата обращения: 13.11.10).

8. В поисках горячей буксы // Общероссийская транспортная газета «Гудок». –

2006. – № 4.

9. Патент № 2337030 РФ, МПК В 61 К 9/04. - № 2006146775/11. Способ мониторинга состояния букс движущегося поезда / Руфицкий М.В., Реутов Д.В.; заявл. 26.12.06; опубл. 27.10.08. Бюл. № 7.

10. Патент № 2368056 РФ, МПК Н 02 К 35/04. - № 2008122818/09. Заявл. 05.06.08. – опубл. 20.09.09. Бюл. № 21.

Д.И. Белов

Владимирский государственный университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНЫХ УДАРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ В СИСТЕМЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО АНАЛИЗА ANSYS

Рассмотрены вопросы, связанные с компьютерным моделированием электронной аппаратуры (ЭА), стойкой к ударным воздействиям. Рассматриваются основные этапы и особенности динамического анализа конструкций в системе конечно-элементного анализа ANSYS. Приводится пример расчета динамических характеристик ячейки ЭА при ударном воздействии высокой интенсивности.

Электронная аппаратура широко применяется в системах аэрокосмического комплекса. С её помощью решаются задачи управления, регулирования, координации и связи. Функциональность и сложность ЭА постоянно возрастает, а оснащённость ею таких объектов, как самолеты и ракеты чрезвычайно велика. Отказ в работе хотя бы одного устройства может приводить к серьезным проблемам в работе всего технического объекта. Поэтому требования к надежности функционирования ЭА постоянно растут, а разработчикам зачастую требуется применять специальные средства для их защиты от дестабилизирующих факторов[1].

Одним из главных факторов, способным существенно влиять на надежность и стабильность работы электронной аппаратуры, являются ударные воздействия. Они могут возникать при старте, приземлении, торможении, разделении ступеней ракет, столкновениях и т.д. При этом интенсивность ударов может достигать десятков тысяч g. В результате этого может происходить деформация корпуса устройства (смятие, разруше-

ние, разгерметизация), деформация несущих элементов (изгибы, трещины, смятие), нарушения состояния или расположения элементов (смещения и отрывы их корпусов, перемещения или разрывы контактных элементов и т.д.)[2].

Для создания ударозащищенной электронной аппаратуры разработчикам необходимо проводить специальные испытания для получения и анализа динамических характеристик её конструкции. Это приводит к дополнительным затратам времени и средств, так как воспроизведение ударов большой интенсивности требует изготовления дорогостоящих макетов и использования уникальных установок. Поэтому при разработке ЭА, подвергаемой интенсивным ударным воздействиям, необходимо сводить испытания к минимуму, заменяя их моделированием с использованием различных математических методов и программных средств, в частности, системы конечно-элементного анализа (СКЭА) ANSYS.

Проведение любого вида исследования в СКЭА ANSYS включает в себя четыре ос-

новых этапа: создание конечно-элементной модели, задание граничных условий, расчет и вывод результатов (рис. 1). Рассмотрим основные операции и особенности динамического исследования электронной аппаратуры при интенсивном ударном воздействии [3].



Рис. 1. Схема проведения исследования в СКЭА ANSYS

Создание конечно-элементной модели включает в себя такие операции, как построение графической модели конструкции, задание свойств её материалов и наложение сетки конечных элементов. Графическая модель создается средствами редактора ANSYS либо импортируется из сторонних программных систем в формате IGES. При этом наиболее эффективным с точки зрения времени моделирования считаются представления элементов конструкции с помощью упрощенных моделей, адекватно описывающих их ключевые особенности. Определением используемых материалов модели в данном виде исследования является количественное задание таких свойств, как модуль Юнга, коэффициент Пуассона, плотность и коэффициент механических потерь (КМП). Также необходимо выбрать тип и количество конечных элементов, используемых в модели.

Следует отметить, что в ANSYS нет возможности вводить коэффициент механических потерь “напрямую”. Для его учета в расчете определяется величина демпфирования конструкции ЭА. Эти две характеристики связаны между собой частотной зависимостью. Поэтому перед непосредственным моделированием конструкции ЭА необходимо рассчитывать собственные частоты колебаний (СЧК) всех его конструктивных элементов.

Задание граничных условий предполагает ввод в расчет специального параметра, описывающего механический удар, и определение элементов конструкции, на которые он

воздействует. Особенность данной операции заключается в том, что в техническом задании ударное воздействие обычно задается в виде импульса ускорений, в то время как в ANSYS его можно определить только в единицах перемещения. Важно и то, что сам импульс можно описать двумя способами: математической функцией или табличным массивом. Для оценки динамических характеристик исследуемой конструкции не только во время, но и после окончания воздействия необходимо использовать табличный массив перемещений.

Перед запуском расчета созданной модели с заданными граничными условиями следует выбрать тип анализа и задать его свойства. В случае исследования реакции конструкции на ударное воздействие - это динамический анализ (Transient). В данном расчете используется переменная, зависящая от времени. Так же делается выбор относительно метода решения: полный, сокращенный и метод суперпозиции. После этого следует выбрать такие опции анализа, как общее время исследования и шаг решения, а также включить опцию вывода результатов во всех временных интервалах[4].

В результате расчета конструкции для анализа доступны такие динамические характеристики, как перемещения, ускорения, деформации и напряжения. Эти данные могут быть представлены в виде массивов данных, графиков, а также графической картины распределения той или иной характеристики.

В качестве примера проведем расчет динамических характеристик ячейки ЭА при воздействии ударного импульса высокой интенсивности. Конструкция ячейки состоит из печатной платы, выполненной из стеклотекстолита, с размещенными на ней электрорадиоэлементами. Печатная плата жестко закреплена по всему контуру. Механические свойства стеклотекстолита, применяемые в расчете: модуль Юнга $3 \cdot 10^{10}$ Н/м², коэффициент Пуассона 0,22, плотность 2000 кг/м³, коэффициент механических потерь 0,05. Они представлены в виде однородных прямоугольных элементов, жестко закрепленных на печатной плате и выполненных из дюралю-

люминия. Механические свойства дюралюминия, применяемые в расчете: модуль Юнга $7,2 \cdot 10^{10}$ Н/м², коэффициент Пуассона 0,325, плотность 2700 кг/м³, коэффициент механических потерь 0,05.

На рис. 2, а представлена конечно-элементная модель исследуемой ячейки в системе ANSYS. Механический удар представляется в виде одиночного импульса ускорения в форме полуволны синусоиды с амплитудой ускорения 500 g и длительностью 1 мс. Воздействию подвергались места крепления печатной платы. Общее время исследования составляло 5 мс для возможности анализа

состояния конструкции после прекращения действия ударного импульса.

На рис. 2, б представлена графическая картина распределения действующих ускорений исследуемой ячейки ЭА в результате воздействия удара. Данное распределение получено в момент времени, равный 0,5 мс, соответствующий достижению максимального ускорения воздействующего импульса. Как видно, значения действующих в конструкции ускорений лежат в пределах от 489 до 737 g. Максимальное значение ускорения превышает амплитуду воздействующего импульса в 1,4 раза.

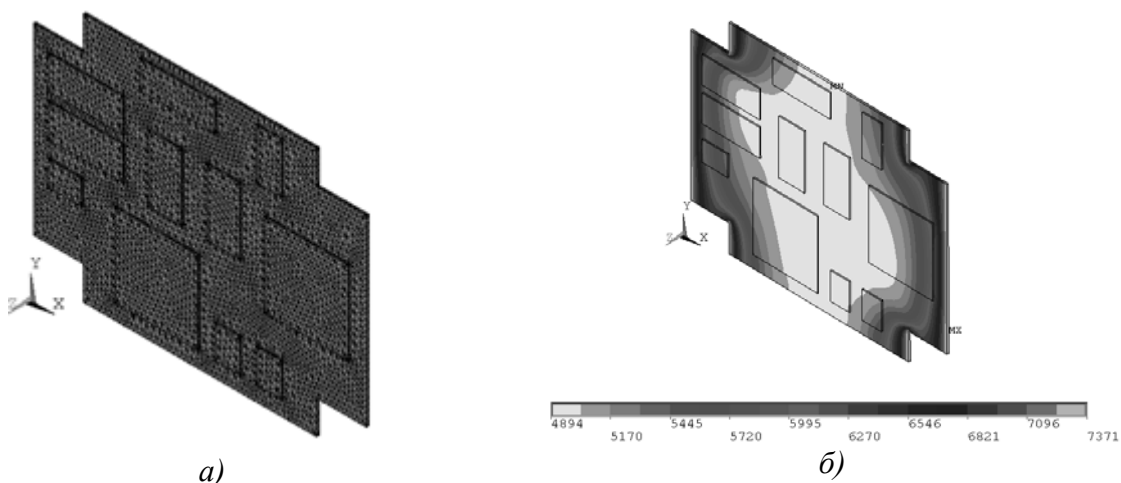


Рис. 2. Исследуемая ячейка ЭА: а – конечно-элементарная модель; б – распределение действующих ускорений

Таким образом, было показано, как производится моделирование конструкции электронной аппаратуры при интенсивном ударном воздействии с помощью системы конечно-элементного анализа ANSYS. Главными факторами, влияющими на точность получаемых при этом результатов, можно считать полноценность конечно-элементной модели исследуемой конструкции и точность описания граничных условий. Анализируя результаты данного моделирования, разработчик электронной аппаратуры принимает решение о возможности применения специальных средств защиты для повышения её стойкости к ударным воздействиям. Таким образом, повышается надежность всего технического объекта, в которой используется данная аппаратура.

Применение системы конечно-элементного анализа ANSYS значительно снижает время и средства, необходимые для проектирования электронной аппаратуры, использующейся в составе авиационной и ракетной техники.

Библиографический список

1. Талицкий, Е. Н. Защита электронных средств от механических воздействий / Е.Н. Талицкий; Владим. гос. ун-т. – Владимир, 2001. – 256 с.
2. Федоров В.К. Контроль и испытания в проектировании и производстве радиоэлектронных средств / В.К. Федоров, Н.П. Сергеев, А.А. Кондрашин. М.: Техносфера, 2005. – 502 с.

3. Морозов, Е.М. ANSYS в руках инженера / Е.М. Морозов [и др.]. М.: Ленанд, 2010. – 456 с. – ISBN 978-5-9710-0279-6

4. Чигарев, А. В., Ansys для инженеров /

А.В. Чигарев, А.С. Кравчук, А.Ф. Смалюк. М.: Машиностроение, 2004. 512 с. – ISBN 5-94275-048-3.

М.С. Беспалов

Владимирский государственный университет

БЕСКОНЕЧНЫЕ МАТРИЦЫ С ФИНИТНЫМИ СТОЛБЦАМИ

Исследована взаимосвязь базисов сопряженных пространств последовательностей над конечным полем, одно из которых есть пространство финитных последовательностей. Введены понятия счетного базиса и невырожденной бесконечной матрицы с финитными столбцами.

При анализе сложных систем встречается случай спектральной обработки сигналов очень большой и меняющейся длины, которую считаем потенциально бесконечной. Непрерывный поток таких сигналов представляют в виде бесконечной матрицы с финитными столбцами.

Пусть F - конечное поле [1, с. 208], содержащее p элементов (p - простое число или степень простого числа).

Прямую сумму $F^n = F \oplus F \oplus \dots \oplus F$, являющуюся абелевой группой с операцией покоординатного сложения, рассмотрим как n -мерное векторное пространство с внешней операцией умножения элементов поля F на элементы этой группы, осуществляемой покоординатно. Множество последовательностей над полем F , которое обозначим $X = F \times F \times \dots \times F \times \dots = \{x \mid x = (x_1, x_2, \dots, x_n, \dots), x_i \in F\}$, также является абелевой группой и линейным пространством над полем F .

Обозначим

$$X_n = \{x \mid x = (x_1, x_2, \dots, x_n, 0, 0, \dots), x_i \in F\}$$

подпространство X , изоморфное F^n . Подпространство всех финитных последовательностей обозначим X_∞ и определим как

$$X_\infty = \bigcup_{n=1}^{\infty} X_n.$$

Пространства X и X_∞ составляют пару сопряженных (дуальных [1, с.108]) пространств. Каждое из них изоморфно пространству линейных функционалов, задаваемых стандартным скалярным произведе-

нием $X \times X_\infty \rightarrow F$, на двойственном пространстве.

Рассматриваем, обозначая $B(\infty)$ или B , матрицы бесконечного порядка с финитными столбцами, то есть матрицы, столбцы которых есть элементы пространства X_∞ , а строки – элементы X .

Для сравнения отметим, что как определение невырожденности квадратной матрицы конечного порядка n можно рассматривать любое из следующих эквивалентных утверждений: 1) определитель матрицы отличен от нуля; 2) столбцы (строки) матрицы линейно независимы; 3) столбцы (строки) матрицы полны в F^n , то есть линейная оболочка столбцов (строк) совпадает с F^n . Последнее утверждение можно переформулировать в виде: 4) столбцы (строки) матрицы служат минимальным порождающим набором для линейного пространства.

Доказывается [1], что столбцы невырожденной матрицы порядка n составляют базис F^n , то есть произвольный элемент F^n единственным образом представляется в виде линейной комбинации элементов базиса.

На бесконечные матрицы над конечным полем понятие определителя в общем случае не распространяется. Например, диагональная матрица над полем из трех элементов $\{0,1,2\}$ с числом 2 на диагонали.

В случае бесконечномерного пространства различаются понятия алгебраического базиса [2, с. 196](базиса Гамеля [3, с. 124]) и

топологического базиса (базиса Шаудера). В первом случае допустимыми считаются только конечные суммы, которые называют линейными комбинациями. Счетная система элементов называется линейно независимой [1, с.100], если любой *конечный* набор элементов этой системы линейно независим. Полнота набора означает возможность представления любого элемента пространства с помощью *конечного* числа допустимых операций через элементы системы.

Предложение. Любая счетная система элементов пространства X_∞ составляет (алгебраический) базис пространства X_∞ , если она линейно независима и полна.

Определение 1. Матрицу $V(\infty)$ с конечными столбцами назовем

невырожденной, если ее столбцы составляют базис пространства X_∞ .

Основным базисом пространства X_∞ назовем $\{e_m\}_{m=1}^\infty$, где $e_1=(1,0,0,0,0,\dots)$, $e_2=(0,1,0,0,0,\dots)$, $e_3=(0,0,1,0,0,\dots)$ и т.д.

Во втором случае расширяется число допустимых операций и наряду с линейными комбинациями допускаются счетные суммы, которые существуют при наличии сходимости в топологии пространства. В пространстве X рассматриваем тихоновскую топологию покоординатной сходимости, также называемой покоординатной стабилизацией.

Счетные линейные комбинации вида $\sum_{i=1}^\infty k_i d_i$, где $k_i \in F$, $d_i \in X$, в отдельных случаях (например d_i есть различные элементы основного базиса пространства X_∞) представляют элемент, так как происходит покоординатная стабилизация частных сумм. В других случаях, (например, $k_i \equiv 1$, $d_i \equiv x \in X$) стабилизации нет.

Согласно общепринятой терминологии в виде линейной комбинации элемент *представляют*. В случае стабилизации счетной линейной комбинации к элементу, будем говорить, что этот элемент *вычисляют*.

Определение 2. Счетная система $\{d_i\}_{i=1}^\infty$ элементов пространства X называется *счетно замкнутой* в X , если любая счетная ли-

нейная комбинация различных элементов системы вычисляет элемент пространства X .

Счетная система $\{d_i\}_{i=1}^\infty$ элементов пространства X называется *счетно полной* в X , если любой $x \in X$ можно вычислить через $\{d_i\}_{i=1}^\infty$ в виде счетной линейной комбинации различных элементов системы. Счетная система $\{d_i\}_{i=1}^\infty$ элементов пространства X называется *счетно линейно независимой*, если любая нетривиальная счетная линейная комбинация различных элементов системы отлична от нуля. Счетная система $\{d_i\}_{i=1}^\infty$ элементов пространства X называется *счетным базисом* X , если она счетно замкнута, счетно полна и счетно линейно независима.

В определении уточнили понятие базиса Шаудера применительно к пространству последовательностей X с тихоновской топологией.

Замечание. Любая счетная линейная комбинация элементов системы $\{d_i\}_{i=1}^\infty$ определяется набором коэффициентов $y=(k_1, k_2, \dots, k_n, \dots) \in X$ и может быть представлена в виде произведения матриц yV , где матрица $V(\infty)$ получается построчной записью элементов системы $\{d_i\}_{i=1}^\infty$. Итак, любой $y \in X$ служит кодирующим элементом для $x \in X$ по правилу

$$x = \sum_{i=1}^\infty k_i d_i.$$

Счетная замкнутость гарантирует покоординатную стабилизацию ряда. Счетная полнота означает существование кодирующего элемента $y \in X$ для произвольного $x \in X$. Из счетной линейной независимости вытекает единственность кодирующего элемента.

Теорема. Для матрицы бесконечного порядка над полем F столбцы составляют базис пространства X_∞ тогда и только тогда, когда строки являются счетным базисом пространства X . Разобьем формулировку теоремы, которая также приведена в [4], на три отдельных утверждения.

Утверждение 1. Для матрицы бесконечного порядка с элементами из поля F все столбцы будут конечными тогда и только то-

гда, когда строки счетно замкнуты.

Доказательство. Если столбцы финитны, то любая счетная линейная комбинация строк стабилизируется по каждой координате. И наоборот, требование стабилизации для каждой координаты означает в случае конечного поля финитность соответствующего столбца.

Утверждение 2. Столбцы матрицы с финитными столбцами линейно независимы тогда и только тогда, когда ее строки счетно полны.

Утверждение 3. Столбцы матрицы с финитными столбцами полны в X_∞ тогда и только тогда, когда строки счетно линейно независимы.

Прямое доказательство этих утверждений разобьем на леммы.

Для произвольного элемента $x=(x_1, \dots, x_m, \dots) \in X$ его n -усечением назовем $\lfloor x \rfloor_n = (x_1, \dots, x_n, 0, 0, \dots) \in X_n$. Аналогично определим n -усечение матрицы $V(\infty)$ как квадратную матрицу порядка n , состоящую из первых n строк и столбцов матрицы V .

Наряду с терминами представляет (для линейных комбинаций) и вычисляет (для счетных линейных комбинаций) введем новое понятие.

Определение 3. Совокупность элементов $\{d_i\}_{i=1}^\infty$ реализует пространство X , если для любого $x \in X$ существует последовательность $\{s_n\}$ линейных комбинаций элементов данной совокупности такая, что для любого n равны n -усечения x и s_n : $\lfloor x \rfloor_n = \lfloor s_n \rfloor_n$.

При этом будем также говорить, что любой элемент пространства X реализуем через данную совокупность. Последовательность $\{s_n\}$ будем называть последовательностью частных сумм. Вместо $\{s_n\}$ будем брать $\{l_n\}$, которую назовем реализующей элемент $x \in X$ последовательностью, построенную по правилу $l_1 = s_1$, $l_i = s_i - s_{i-1}$ при $i > 1$. Реализующую последовательность назовем

упорядоченной, если для всех i : или $l_i = 0$, или $\lfloor l_i \rfloor_i = ae_i$, где $a \neq 0$, $a \in F$.

Матрицу V назовем помеченной, если дана последовательность чисел $\{m_j\}$ такая, что все элементы j -го столбца с номерами, которые больше m_j , равны нулю. Число m_j назовем меткой j -го столбца.

Лемма 1. Счетно замкнутая совокупность $\{d_i\}_{i=1}^\infty$ элементов пространства X вычисляет произвольный элемент $x \in X$ тогда и только тогда, когда данная совокупность реализует этот элемент x .

Доказательство. Любая счетно замкнутая совокупность $\{d_i\}_{i=1}^\infty$, записанная построчно, составляет матрицу с финитными столбцами, которую можно пометить метками m_j . Пусть совокупность $\{d_i\}_{i=1}^\infty$ вычисляет элемент $x \in X$ посредством кодирующего элемента $y=(k_1, k_2, \dots, k_n, \dots) \in X$: $x = \sum_{i=1}^\infty k_i d_i$. В качестве упорядоченной реализующей элемент x совокупности возьмем: $l_1 = \sum_{i=1}^{m_1} k_i d_i$, $l_s = \sum_{i=m_{s-1}+1}^{m_s} k_i d_i$ (или $l_s = 0$, если $m_{s-1} \geq m_s$) для $s \geq 2$.

Пусть счетно замкнутая совокупность $\{d_i\}_{i=1}^\infty$ реализует $x \in X$ с помощью последовательности частных сумм $s_n = \sum_{i=1}^\infty a_i(n) d_i$. Из последовательности $\{a_1(n)\}_{n=1}^\infty$ возможных коэффициентов перед первой строкой выберем предельную точку a_1 , которая существует ввиду конечности поля F , и подпоследовательность $\{s_{n_m}\}_{m=1}^\infty$ такую, что $a_1(n_m) = a_1$. Полагая $s_n' = s_{n_m}$ при $n_{m-1} < n \leq n_m$, получим для элемента x последовательность частных сумм $\{s_n'\}_{n=1}^\infty$ с фиксированным первым коэффициентом $s_n' = a_1 d_1 + \sum_{i=2}^\infty a_i(n) d_i$ (где $a_i(n)$ другие).

Аналогично из последовательности $\{s_n\}_{n=1}^{\infty}$ выделяем подпоследовательность с фиксированным вторым коэффициентом.

Проделав бесконечное число шагов данного алгоритма, получим для элемента x кодирующий элемент $y=(a_1, a_2, \dots, a_n, \dots) \in X$, позволяющий вычислить данный элемент x по формуле $x = \sum_{i=1}^{\infty} a_i d_i$. При доказательстве леммы 1 используется конечность поля. Для последующих лемм это требование существенно. Для обеспечения единственности реализации каждого отдельного элемента пространства X потребуем выполнения следующего экстремального свойства реализующей совокупности. Пусть Y есть подпространство векторного пространства X , не обязательно собственное.

Определение 4. Счетно замкнутую совокупность $\{d_i\}_{i=1}^{\infty}$ элементов, реализующую Y , назовем *минимальной реализующей пространством Y совокупностью*, если при удалении любого элемента совокупности оставшаяся совокупность не реализует Y . Непосредственной проверкой легко установить, что счетный базис есть минимальная реализующая пространство X совокупность. Методом от противного легко доказывается следующая лемма.

Лемма 2. Счетно замкнутая совокупность $\{d_i\}_{i=1}^{\infty}$ элементов пространства X , реализующая подпространство $Y \subset X$, является минимальной реализующей совокупностью для Y тогда и только тогда, когда данная совокупность счетно линейно независима в X .

Лемма 3. С помощью элементарных преобразований строк любую невырожденную матрицу $B(\infty)$ можно привести к невырожденной верхнетреугольной или к единичной; причем так, что n -усечение преобразуемой матрицы для любого наперед заданного n примет требуемый вид (который при дальнейших преобразованиях не меняется) после применения конечного числа элементарных преобразований.

Доказательство. Методом от противного устанавливается, что применение даже бес-

конечного числа последовательных преобразований метода Гаусса сохраняет свойство линейной независимости столбцов, так как в силу финитности столбцов доказательство сводится к случаю конечной матрицы.

Свойство полноты столбцов сохраняется при одном элементарном преобразовании строк, что очевидно для случая перестановки строк. Пусть изменилась только i -я строка матрицы при преобразовании метода Гаусса. Для произвольного элемента $x \in X_{\infty}$ существует p различных элементов $x(1), x(2), \dots, x(p)$, совпадающих с x на всех, за исключением i -й, координатах. Каждый из этих элементов представим в виде линейной комбинации столбцов. Умножение i -й координаты на $a \in F$ ($a \neq 0$) или добавление к i -й координате $a \in F$ меняет эти элементы местами. Поэтому одна из данных линейных комбинаций даст представление x через столбцы преобразованной матрицы.

Матрица приводится к верхнетреугольной методом Гаусса, а к единичной методом Гаусса--Жордана. Если первые $k-1$ столбцов приведены к требуемому виду, то в k -м столбце обязан существовать ненулевой элемент ниже $(k-1)$ -й строки. Поставим эту строку на место k -й строки и с помощью конечного числа основных преобразований метода Гаусса относительно этой строки обнулیم все элементы k -го столбца ниже (а в случае Гаусса--Жордана и выше) диагонального.

Не нарушая общности, достаточно доказать, что первая строка не будет бесконечно долго сдвигаться вниз. В силу полноты столбцов первый вектор основного базиса линейно выражается через столбцы исходной матрицы: $e_1 = c_1 t_{i_1} + \dots + c_k t_{i_k}$, где $c_j \neq 0$, $c_j \in F$. Сформируем слева от матрицы вспомогательный столбец, который в любой момент времени содержит значение указанной линейной комбинации, вычисленной по текущим значениям в выбранных столбцах. Показывается, что единица в вспомогательном столбце не может оказаться ниже i_k -й строки, если i_k больше i_1, \dots, i_{k-1} .

Лемма 4. Если столбцы матрицы $B(\infty)$ линейно независимы в X_∞ , то совокупность строк матрицы B реализует пространство X .

Доказательство. Методом Гаусса над строками приведем матрицу B к верхнетреугольному виду как в лемме 3, но запоминая номера i_1, i_2, \dots тех строк исходной матрицы, которые ставили на соответствующие (первое, второе и т.д.) места. Тогда k -я строка полученной матрицы есть линейная комбинация строк с номерами i_1, \dots, i_k исходной матрицы. Для невырожденной верхнетреугольной матрицы построение соответствующей упорядоченной реализующей последовательности для произвольного элемента очевидно. Элементы этой последовательности будут представлены как линейные комбинации строк исходной матрицы.

Лемма 5. Если столбцы матрицы $B(\infty)$ линейно зависимы, то существует $x \in X$, который нельзя вычислить через строки матрицы B .

Доказательство. Если столбцы t_i матрицы B линейно зависимы, то некоторый столбец линейно выражается через набор других столбцов с ненулевыми коэффициентами. Для определенности полагаем, что $t_1 = a_2 t_2 + \dots + a_k t_k$, где $t_i \in X_\infty$, $a_i \in F$, $a_i \neq 0$. Тогда $e_1 = (1, 0, 0, \dots) \in X$ не вычисляется через строки матрицы, так как для любой счетной линейной комбинации строк $y = \sum_{i=1}^{\infty} c_i d_i = (y_1, \dots, y_m, \dots) \in X$ имеем $[y]_k \neq e_1$. Действительно, $y_1 = a_2 y_2 + \dots + a_k y_k$ и невозможны соотношения $y_1 = 1$, $y_2 = \dots = y_k = 0$ одновременно.

Из лемм 1, 4, 5 вытекает утверждение 2. Переходим к доказательству утверждения 3.

Лемма 6. Если столбцы $\{t_i\}$ матрицы B полны в X_∞ , то строки матрицы счетно линейно независимы в X .

Доказательство от противного. Предположим, что одна из строк линейно вычисляется через остальные $d_{i_0} = \sum_{i=1, i \neq i_0}^{\infty} c_i d_i$. Из

полноты столбцов заключаем, что элемент $e_{i_0} \in X_\infty$ допускает представление

через столбцы, то есть $e_{i_0} = \sum_{j=1}^k a_j t_j$ для некоторого k . Рассмотрим k -усечения: $[d_{i_0}]_k = \sum_{i=1, i \neq i_0}^{\infty} c_i [d_i]_k$, где в

сумме конечное число ненулевых слагаемых за счет финитности первых k столбцов. Значит, данное равенство указывает конечную линейную комбинацию, позволяющую вычислить i_0 -ю координату любого из столбцов t_1, \dots, t_k через остальные координаты.

Эта же линейная комбинация позволяет вычислить i_0 -ю координату элемента

$\sum_{j=1}^k a_j t_j \in X_\infty$, равную 1, через остальные координаты, равные нулю, что невозможно. Из лемм 1, 4, 6 вытекает

Следствие. Если столбцы матрицы B базис в X_∞ , то строки есть счетный базис в X .

Лемма 7. Если строки матрицы $B(\infty)$ образуют минимальную реализующую X совокупность, то столбцы полны в X_∞ .

Доказательство. Из леммы 5 следует, что столбцы линейно независимы. Предположим, что столбцы не полны. Рассмотрим их пополнение, образующее базис в X_∞ , которое существует согласно теореме о базисе [1, с.105]. Разместим это пополнение в виде новых столбцов матрицы. Пусть один из добавленных столбцов будет первым. Тогда из лемм 4, 6 вытекает, что удлиненные строки образуют новую минимальную реализующую X совокупность. Согласно леммам 1, 2 элемент $e_1 = (1, 0, 0, \dots) \in X$ вычисляется с помощью единственного кодирующего элемента $y \in X$ через удлиненные строки. Если удалим все добавленные столбцы, то получим нетривиальную счетную линейную комбинацию с кодирующим элементом y , вычисляющую элемент $0 \in X$. По лемме 2 приходим к противоречию с утверждением о минимальности.

Лемма 8. Если строки матрицы $B(\infty)$ образуют минимальную реализующую под-

пространство $Y \subset X$ совокупность, то столбцы полны.

Доказательство. По теореме о базисе рассмотрим пополнение множества строк матрицы до минимальной реализующей X совокупности. Тогда столбцы удлиненной матрицы полны. При исключении из них добавленных координат свойство полноты столбцов сохраняется.

Леммы 2, 6, 8 составляют доказательство утверждения 3. Итак, все утверждения теоремы доказаны. Также установлено, что минимальная реализующая пространство X совокупность является счетным базисом X .

Сформулируем свойства матриц бесконечного порядка с финитными столбцами над конечным полем. Только в первом свойстве не требуем невырожденности матриц.

С.1. Произведение матриц с финитными столбцами есть матрица с финитными столбцами. Матрицы с финитными столбцами ассоциативны: $(AB)C = A(BC)$.

С.2. Невырожденная матрица B переводит базис $\{v_i\}_{i=1}^{\infty}$ пространства X_{∞} (записанный в виде столбцов) в базис $\{Bv_i\}_{i=1}^{\infty}$ пространства X_{∞} . В частности, основной базис $\{e_i\}_{i=1}^{\infty}$ переводит в базис $\{t_i\}_{i=1}^{\infty}$, состоящий из столбцов матрицы B .

С.3. Произведение двух невырожденных матриц есть невырожденная матрица.

Отметим, что основной базис $\{e_i\}_{i=1}^{\infty}$, записанный, например, по столбцам, дает единичную матрицу E бесконечного порядка.

С.4. У невырожденной матрицы B существует обратная матрица B^{-1} , которая также является невырожденной (с финитными столбцами). В частности, матрица B^{-1} переводит базис $\{t_i\}_{i=1}^{\infty}$ из столбцов матрицы B в базис $\{e_i\}_{i=1}^{\infty}$.

Работа выполнена при финансовой поддержке АБЦП «Развитие научного потенциала высшей школы», 2.1.1 / 5568.

Библиографический список

1. Ленг, С. Алгебра / С. Ленг. - М.: Мир, 1968. - 564 с.
2. Эдвардс, Р. Ряды Фурье в современном изложении / Р. Эдвардс Т.1.- М.: Мир, 1985. - 262 с.
3. Колмогоров, А. Н. Элементы теории функций и функционального анализа / А.Н. Колмогоров, С.В. Фомин. - М.: Наука, 1968. - 496 с.
4. Беспалов, М. С. Математические методы в информатике и вычислительной технике: В 2 ч. Ч. 1. Элементы функционального анализа и алгебры; Владим гос. ун-т. - Владимир, 2006. - 92 с. - ISBN 5-89368-679-9.

А.А. Бурцев, М.Н. Герке, О.Я. Бутковский
Владимирский государственный университет

ПАССИВНЫЕ МОДУЛЯТОРЫ НА ОСНОВЕ ОДНОСТЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Рассмотрены способы получения ультракоротких лазерных импульсов с помощью синхронизации мод. Продемонстрирована экспериментальная реализация синхронизации мод с помощью насыщающихся поглотителей SESAM и SAINT.

Одной из важнейших проблем лазерной физики и квантовой электроники является генерация лазерного излучения в виде импульсов предельно малой длительности. Решение этой проблемы открывает пути создания лазеров, обладающих предельно высокой интенсивностью излучения. Другим

обстоятельством, мотивирующим развитие лазеров ультракоротких импульсов (УКИ), считается необходимость измерения предельно коротких интервалов времени.

Для получения сверхкоротких лазерных импульсов фемтосекундного диапазона требуется выполнить ряд условий: активная

среда должна иметь достаточную ширину полосы усиления, что обеспечивается её надлежащим выбором; должна осуществляться синхронизация возможно большего числа продольных мод лазерного резонатора; возможно, потребуется ряд специальных мер по компенсации дисперсии во внутрирезонаторных элементах, что достигается соответствующим построением резонатора.

Существует активная и пассивная синхронизация мод. Главное различие этих двух методов состоит в том, что при активной синхронизации мод модулятор управляется внешним сигналом (амплитудный или фазовый модулятор), а при пассивной – синхронизация мод осуществляется за счёт модуляции внутри нелинейных элементов резонатора лазера: насыщающегося поглотителя или же керровской нелинейности самой активной среды, при этом система управляется сама.

При пассивной синхронизации мод основной механизма, как и при активной синхронизации, является временная модуляция потерь в резонаторе. Однако в отличие от активной при пассивной синхронизации система сама определяет моменты времени, соответствующие минимуму потерь. Осуществляется это с помощью так называемого насыщающегося поглотителя (или пассивного модулятора), который помещается в оптический резонатор лазера. Этот оптический прибор устроен так, что ослабляет свет низкой интенсивности и передает высокий пик интенсивности. Подобная зависимость коэффициента пропускания поглотителя от интенсивности падающего излучения типична для одного из самых распространённых нелинейно-оптических эффектов – эффекта насыщения. Выбирается поглотитель, у которого частота перехода совпадает с частотой лазера, интенсивность насыщения невелика и время релаксации много меньше времени прохода резонатора (быстрый насыщающийся поглотитель).

Первым типом пассивных модуляторов были лазеры на красителе. Но в настоящее время более широко применяются модуляторы на основе полупроводников. При ис-

пользовании полупроводниковых слоистых структур (квантовые ямы) были созданы просветляющиеся поглотители, рабочую длину волны которых можно было изменять подбором материалов и толщины слоев. Такие устройства получили название SESAM (semiconductor saturable absorber mirror) (рис. 1).

В отличие от красителей они обладают двумя временами релаксации просветленного состояния: сравнительно большим (десятки пикосекунд), которому соответствует меньшая интенсивность насыщения, и малым (десятки фемтосекунд) с большей интенсивностью насыщения. Но тем не менее следует признать, что применение данного модулятора очень тесно привязано к конкретной длине волны и определенному режиму работы лазера.

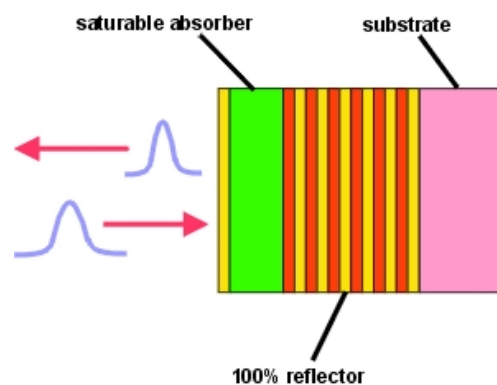


Рис. 1. Принцип конструкции модулятора SESAM

В последнее время всё больший интерес вызывают модуляторы на основе нанотрубок. Значительный прогресс в области приготовления одиночных одностенных углеродных нанотрубок (ОУН) связан с технологией обработки интенсивным ультразвуком их взвеси в воде с добавлением поверхностно-активных веществ и с последующим центрифугированием, позволяющим разделить фрагменты дисперсного материала по массе. Эта технология дает возможность с хорошей воспроизводимостью получать взвеси нанотрубок со значительным процентным содержанием одиночных нанотрубок. Их наличие проявляется в виде отдельных, хорошо разрешенных пиков в спектрах оптического поглощения и люминесценции, а так-

же в спектрах комбинационного рассеяния света.

Конструкция поглотителя SAINT (рис. 2) (saturable absorber injected nanotubes) достаточно тривиальна и реализует принципы. На высокоотражающее широкополосное зеркало как на основу наносится слой полимера (КМЦ) с замешанными в него ОУН. После полива зеркала оно сушится в термостате до затвердевания полимерной пленки.

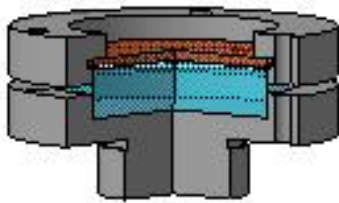


Рис. 2. Конструкция модулятора SAINT

На следующем этапе пленка закрывается тонким покровным стеклом для защиты от внешней среды. Производится дополнительная герметизация всего «бутерброда» зеркало – плёнка - покровное стекло по образующей минеральным маслом для предотвращения контакта полимера с воздухом. Если этим пренебречь, то, как показала экспериментальная практика, под действием мощного лазерного пучка происходит быстрая деградация полимерной связки из-за химической реакции с атмосферным кислородом.

В данной работе были проведены экспе-

рименты по получению ультракоротких лазерных импульсов на лазере с пассивной синхронизацией мод (Yb:LYSO, $\lambda=1.05$ мкм) с помощью пассивных модуляторов SESAM (на основе полупроводников) и SAINT (на основе нанотрубок). Схема лазера представлена на рис. 3.

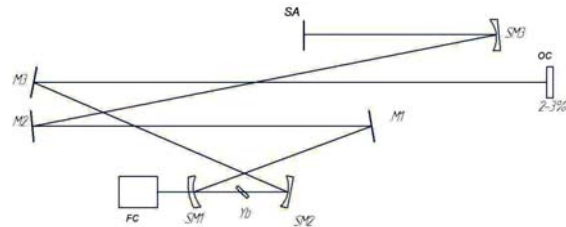


Рис. 3. Оптическая схема лазера на кристалле Yb:LYSO. SA – пассивный модулятор (в первой серии экспериментов использовался SESAM, во второй – SAINT)

Достигнута синхронизация мод с помощью поглотителя на основе ОУН. Хотя сейчас он уступает аналогичному поглотителю на основе полупроводников, можно утверждать, что дальнейшие исследования по оптимизации процесса получения и эксперименты по практическому применению ОУН в качестве пассивных затворов позволят не только достигнуть результатов, полученных с помощью полупроводников, но и выйти на новый уровень в методах генерации УКИ.

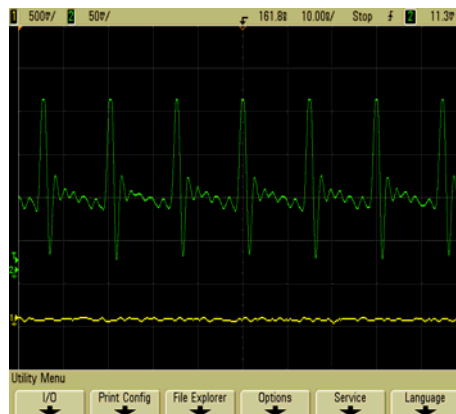


Рис. 4. Осциллограммы излучения генерации мод с помощью пассивных модуляторов SESAM и SAINT

Л.В. Грунская, В.А. Ефимов, А.А. Закиров, Д.В. Рубай

СОЛНЕЧНЫЕ И ЛУННЫЕ ПРИЛИВЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ И ГЕОМАГНИТНОМ ПОЛЯХ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ

Осуществляется оценка средней амплитуды напряженности электрического и геомагнитного поля пограничного слоя атмосферы на частотах лунно-солнечных приливов. Специфика поставленной задачи связана с необходимостью использования большого временного ряда экспериментальных данных. Создана система многопунктного мониторинга вертикальной составляющей напряженности электрического поля, разработана методика обработки экспериментальной информации. Задача оценки амплитуды сигнала на частотах приливов решена с помощью радиотехнического метода корреляционного квадратурного приемника (ККП). Проанализированы экспериментальные данные по электрическому полю приземного слоя атмосферы в диапазоне лунно-солнечных приливов по станциям гидрометеорологической службы.

Приливные эффекты наблюдаются в гравиметрии, геомагнитном поле, записях атмосферного давления, электрическом поле ионосферы и приземного слоя атмосферы и являются предметом теоретических и экспериментальных исследований в течение последних двух столетий. Исследования влияния лунно-солнечных приливов на характеристики пограничного слоя атмосферы важны с нескольких точек зрения: это фундаментальные исследования, связанные с атмосферно-электрическими явлениями в пограничном слое атмосферы; проводимые исследования являются важным шагом при изучении взаимосвязи электрических полей с геофизическими процессами; приливы играют важную роль в формировании геодинамического режима в сейсмоактивных регионах Земли.

Работы, проводимые во Владимирском государственном университете на кафедре общей и прикладной физики, связаны с постановкой регулярных измерений электрического и геомагнитного полей пограничного слоя атмосферы на сети разнесенных в пространстве станций с целью анализа их взаимосвязей с приливными процессами. В 2000-2010 годах осуществлен режим синхронного мониторинга электрического и геомагнитного полей с помощью аппарату-

ры, созданной во Владимирском государственном университете (ВлГУ), на разнесенных в пространстве станциях: физический экспериментальный полигон ВлГУ; станция на оз. Байкал Института солнечно-земной физики СО РАН; станция в п. Паратунка (Камчатка), Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН; станция в г. Обнинске на базе научно - производственного объединения «Тайфун». Осуществлена оценка степени воздействия лунно-солнечных приливов на электрическое и геомагнитное поля пограничного слоя атмосферы.

Результаты спектрального анализа вертикальной составляющей напряженности электрического поля пограничного слоя атмосферы

Был осуществлен анализ экспериментальных данных, полученных в сети разнесенных в пространстве станций, с помощью корреляционного квадратурного приемника [1, 2] с целью оценки степени воздействия лунных приливов на электрическое поле пограничного слоя атмосферы. Для достоверности получаемых результатов по выделению воздействия лунных приливов на электрическое поле приземного слоя атмосферы дополнительно использован широкий комплекс наземных геофизических данных по станциям гидрометеорологической службы: Воейково, Верхняя Дуброва, Душети (29 лет,

21 год, 14 лет). Высокая разрешающая способность по частоте ($f=3,17e-9$ Гц), достигнутая благодаря размерам временных рядов экспериментальных данных, позволила осуществить оценку амплитуды и отношения сигнал/шум на частотах лунных приливов.

Среднее значение амплитуды электрического поля и отношение сигнал/шум на частотах термических солнечных приливов S1, S2, S3 по указанным станциям составили соответственно: S1(15В/м, с/ш- 6,4; 10В/м, с/ш- 3,9; 12,4В/м, с/ш- 4,2); S2 (10 В/м, с/ш- 5,2; 7 В/м, с/ш- 4,9; 10В/м, с/ш-5,4); S3 (3В/м, с/ш- 5,3; 4В/м, с/ш- 4,9; 6В/м, с/ш- 3,5) (табл. 1). Сравнение полученных оценок амплитуды электрического поля на частотах солнечных приливов по данным станций на полигоне ВлГУ, в ГГО НИЦ ДЗА, а также станций гидрометеорологической службы показывает их сопоставимость и одинаковый порядок результатов с полученными теоретическими оценками [3, 4]. Большой массив данных (29 лет, 21 год, 14 лет) позво-

лил получить необходимую разрешающую способность (10^{-9} Гц) для разделения близких по частоте приливов P1 и S1.

Отношение сигнал / шум на частотах лунных приливов находится в пределах: на частоте прилива M1: 1,8 – 3,1, на частоте прилива M2: 1,3 – 2,3, на частоте прилива N2: 0,9 – 1,6, на частоте прилива O1: 2 – 1,5, на частоте прилива L2: 4,2 - 1,1 (см. табл. 1). Отношение сигнал / шум на частотах лунных приливов изменяется в пределах 4,2 - 1,1. Среднее значение амплитуды электрического поля на частотах лунных приливов составило 12,2 – 1,7 В/м (см. табл. 1), что соответствует теоретическим оценкам для E_z на частотах лунных приливов согласно разработанной модели [4]. На рис. 1 приведены примеры спектров электрического поля пограничного слоя атмосферы вблизи частот солнечных приливов. На рис. 2 даны примеры спектров электрического поля пограничного слоя атмосферы вблизи частот лунных приливов.

Таблица 1. Результаты спектрального анализа вертикальной составляющей электрического поля

№ п/п	Источник	Частота, 10^5 Гц	Станция полигон ВлГУ		Станция Байкал, Хулу-гайша		Станция Байкал, Монды		Станция Байкал		Станция Обнинск		Станция Верхняя Дуброва		Станция Воейково		Станция Душети	
			А, В/м	с/ш	А, В/м	с/ш	А, В/м	с/ш	А, В/м	с/ш	А, В/м	с/ш	А, В/м	с/ш	А, В/м	с/ш	А, В/м	с/ш
1	Прилив 2N2	1,938951388	4,27	1,33	2,6	1,47	3,56	2,54	2,2	1,72	5,27	0,54	0,5	0,53	1,3	1,04	0,8	0,53
2	Прилив M2	2,237136465	5,29	2,12	9,81	0,58	2,52	1,81	2,4	1,74	2,3	1,33	1,1	0,92	2,3	1,77	1,3	0,68
3	Прилив Mf	0,089028575	1,8	0,56	3,1	0,61	6,05	1,33	6,8	1,26	4,1	1,03	1,8	0,43	4,5	1,15	2,2	1,09
4	Прилив N2	2,195871761	3,61	0,97	8,89	0,49	0,78	0,51	1,1	0,73	3,2	0,98	0,5	0,59	0,4	0,48	0,8	1,95
5	Прилив O1	1,075921027	6,39	2,78	3,8	1,33	2,36	1,07	2,8	1,45	2,1	1,06	0,9	0,81	2,2	1,48	1,5	1,36
6	Прилив Q1	1,080148997	6,45	1,46	3,1	1,34	2,72	1,29	2,3	1,13	2,1	1,44	0,8	0,53	1,4	0,74	1,2	1,09
7	Прилив M1	1,11680819445	5,91	1,18	6,1	1,21	5,76	1,23	2,3	1,33	2,6	1,29	2,6	1,71	2,8	1,43	2,8	1,91
8	Прилив J1	1,2043449074	8,47	1,96	6,61	0,94	2,82	0,91	1,3	0,69	9,4	0,95	1,9	1,46	3,1	1,63	1,3	0,68
9	Прилив OO1	1,462806134	8,1	1,29	2,6	0,91	1,35	0,84	1,8	1,49	9,1	1,19	1,2	0,85	1,8	1,49	1,2	0,78
10	Прилив L2	2,2770266607	3,1	0,89	6,1	2,37	2,21	0,91	1,7	1,41	3,1	1,29	1,7	1,89	1,1	0,79	1,1	0,85
11	Прилив K1	1,1606313835	7,22	0,52	22,2	1,10	14,3	2,75	19,1	1,16	11	5,07	10,1	5,03	14,7	5,88	7,8	5,2
12	Прилив K2	2,32126276694	7,16	2,93	17,4	1,45	3,34	2,68	14,5	1,61	61,2	5,56	1,6	2,05	2,1	1,9	3,1	2,06
13	Прилив P1	1,1542012927	1,56	5,2	29,2	1,12	0,03	3,13	21,1	1,62	93,1	4,43	12,5	5,01	11,1	5,05	15,6	5,2
14	Прилив S1	1,157407	15,1	2,01	31,1	1,54	3,5	6,10	22,1	1,05	16	5,05	10,7	4,86	14,4	5,14	19,5	4,75
15	Прилив S2	2,314814	8,77	1,75	18,1	0,91	6,33	3,17	13,9	1,39	64,9	4,99	8,4	5,25	10,2	5,10	18,8	4,95
16	Прилив S3	3,472222	7,24	1,67	6,53	0,33	3,75	1,67	3,79	0,63	6,34	0,67	4,3	2,15	2,4	2,53	6,2	4,96
17	Прилив S4	4,629629	2,11	1,24	12,1	0,92	1,94	2,1	5,68	1,49	10,8	1,86	1,9	2,71	2,4	4,8	2,5	3,13

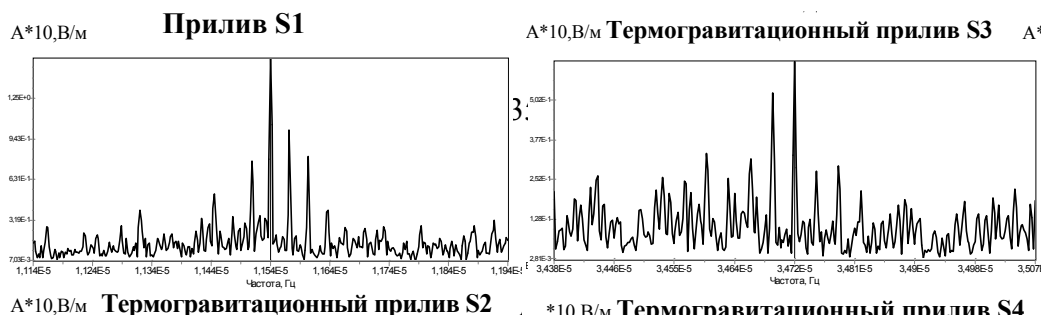


Рис. 1 - Термогравитационные солнечные приливы, данные E_z , Душети 1967 – 1980 гг

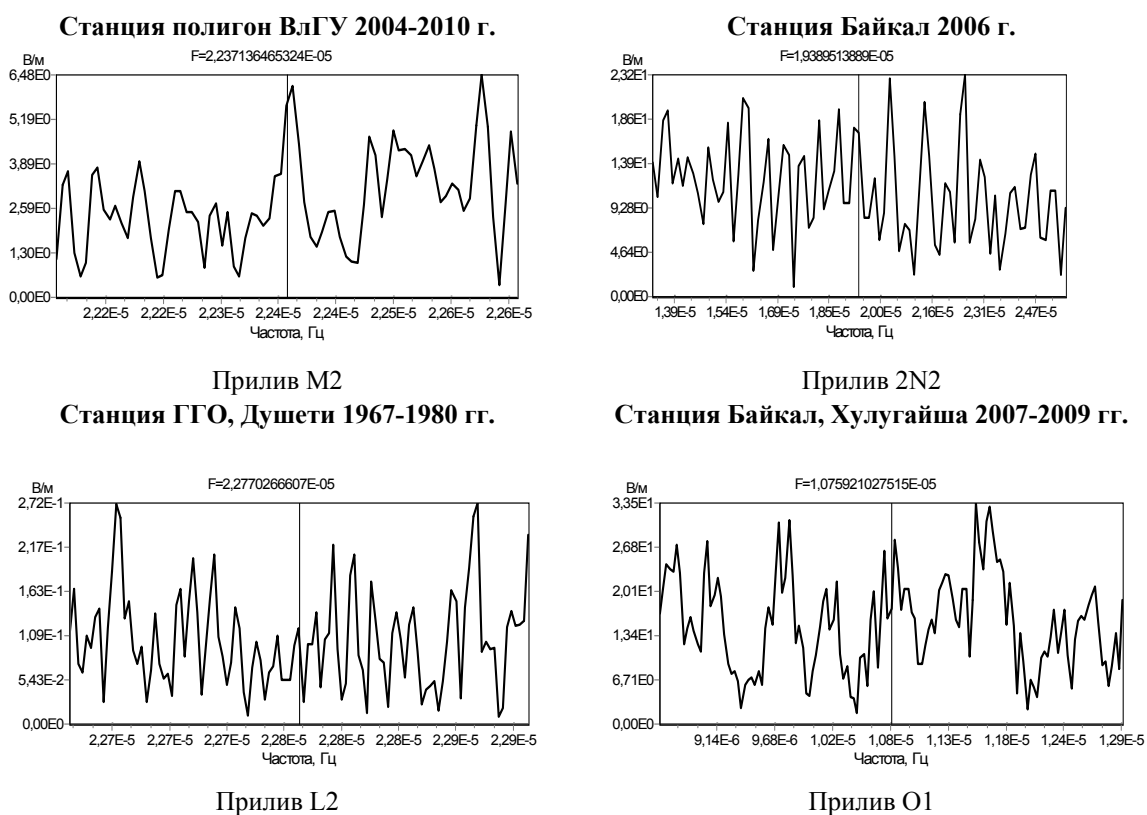


Рис. 2. Спектры лунных приливов по временным рядам электрического поля приземного слоя атмосферы

Результаты спектрального анализа данных геомагнитных станций в диапазоне термических и лунных приливов

В спектрах геомагнитного поля пограничного слоя атмосферы, полученных с помощью корреляционного квадратурного приемника по большим массивам экспериментальных данных японских геомагнитных

станций Kakioka (1913 – 2006 гг.) и Memambetsu (1950 – 1999 гг), благодаря достигнутой высокой разрешающей способности по частоте удалось разделить близкие по частоте приливы P1 и S1.

На рис. 3 приведены примеры результатов корреляционно-спектрального анализа данных геомагнитных станций вблизи частот приливов (компонента D, H, Z). В табл. 2 дана оценка средних амплитуд и отноше-

ния сигнал/шум на частотах термических приливов. Достоверно выделяются четыре термогравитационных солнечных прилива: S1 (сигнал/шум: 8-5), S2 (сигнал/шум:8-4), S3(сигнал/шум:5-4), S4 (сигнал/шум: 6-3).

Сравнение полученных оценок амплитуд геомагнитного поля (D, H, Z - компоненты) на частотах лунно-солнечных приливов показывает одинаковый порядок результатов с полученными теоретическими оценками. По результатам разработанной на данном этапе

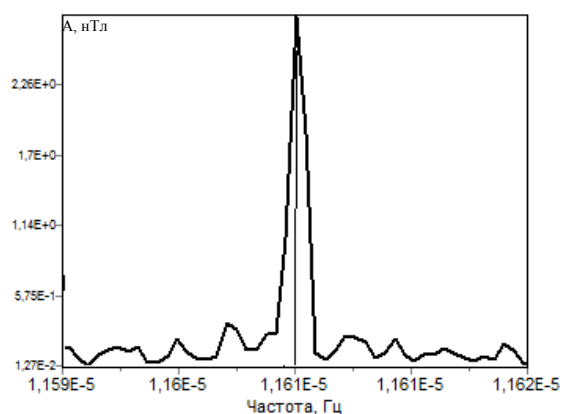
модели оценки амплитуды геомагнитного поля на частотах солнечных приливов должны составлять (6 – 20) нТл, на частотах лунных приливов (0,18 – 1) нТл. Результаты корреляционно-спектральной обработки данных геомагнитного поля по разнесенным в пространстве станциям с помощью программы корреляционно-квадратурного приемника дали: на частотах солнечных приливов (2 – 7) нТл (см. табл. 2), на частотах лунных приливов (0,004 – 0,4) нТл (см. табл. 2).

Таблица 2. Результаты спектрального анализа по данным геомагнитного поля

№ п/п	Название источника	Частота, 10^{-5} Гц	Период, ч	Полигон ВЛГУ 2004-2006 D		Kakioka, D 01.08.1913-31.07.2007		Memambetsu, D 01.01.1950-31.12.1999		Memambetsu, H 01.01.1950-31.12.1999	
				нТл	с/ш	нТл	с/ш	нТл	с/ш	нТл	с/ш
1	Прилив N ₂	2,195871	12,6500	0,3	1,5	0,1	2,5	0,01	2,1	0,04	0,7
2	Прилив M ₂	2,237136	12,4666	0,3	1,1	0,1	5,1	0,1	6,2	0,1	6,1
3	Прилив O ₁	1,075921	25,8176	0,03	0,8	0,05	2,1	0,4	2,4	0,4	3,5
4	Прилив M ₁	1,116808	24,8724	0,04	0,7	0,02	2,0	0,04	1,9	0,3	0,7
5	Прилив L ₂	2,277026	12,1991	0,01	0,8	0,004	0,3	0,02	1,5	0,1	1,2
6	Прилив S ₁	1,157407	24	1,8	5,1	1,38	7,8	1,1	4,5	6,8	5,2
7	Прилив S ₂	2,314814	12	1,1	4,2	1,1	8,2	0,7	3,5	6,7	6,1
8	Прилив S ₃	3,472222	8	1,1	2,1	0,7	5,5	0,4	3,3	4,5	7,5
9	Прилив S ₄	4,629629	6	0,9	2,2	0,2	6,1	0,1	1,5	4,2	8,6

Memambetsu, компонента H, 01.01.1950-31.12.1999

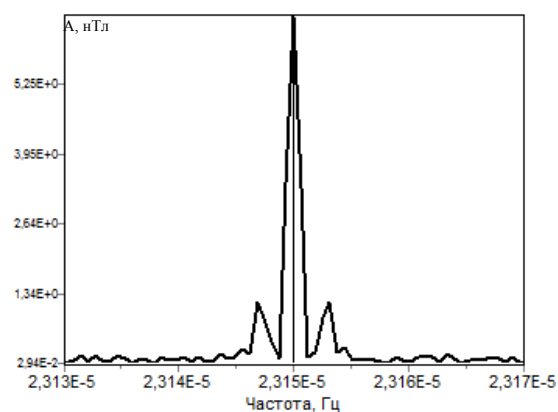
F₀= 1,160631383473E-05



Прилив K1

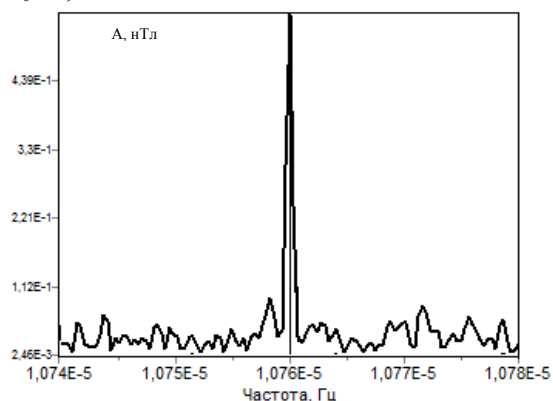
Memambetsu, компонента H, 01.01.1950-31.12.1999

F₀=2,314814E-05

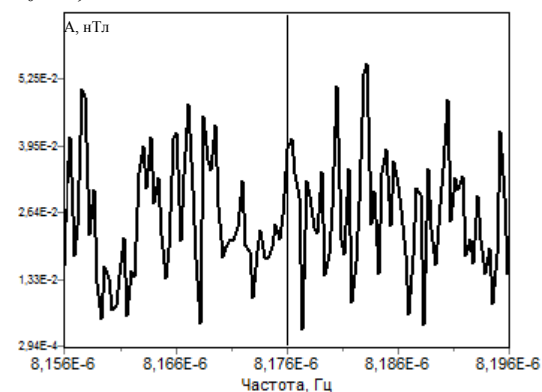


Прилив S2

Рис. 3. Спектры приливов по временным рядам геомагнитного поля приземного слоя атмосферы (см. с. 38)

Какиока, компонента Z, 01.08.1913-31.07.2006 $F_0 = 1,075921027515E-5$ 

Прилив O1

Какиока, компонента Z, 01.08.1913-31.07.2006 $F_0 = 0,81756944764E-05$ 

Прилив Q1

Рис. 3. Окончание

Заключение

С помощью синтезированного для работы в низкочастотном диапазоне оптимального приемника выделены и оценены амплитуды гармонических компонент вариаций электрического поля пограничного слоя атмосферы на частотах, соответствующих лунным приливам, дана оценка отношения сигнал/шум на частотах приливов. Уровень электрического поля на частотах лунных приливов по экспериментальным данным близок к теоретическим модельным оценкам. Анализ полученных результатов по обработке экспериментальных данных геомагнитного поля по разнесенным в пространстве станциям подтверждает адекватность разработанной модели взаимосвязи геомагнитного поля с лунно-солнечными приливными воздействиями.

Метод оптимального приемника позволяет проанализировать характер спектра вблизи солнечных и лунных приливов, его динамику из года в год, от станции к станции, оценить амплитудные характеристики в спектрах электрического и геомагнитного полей на компонентах, соответствующих солнечным и лунным приливам.

Библиографический список

1. Грунская, Л. В. Модифицированный вариант корреляционного квадратурного приемника / Л.В. Грунская, В.А. Мишин // Тезисы 10-й Международной научной-технической конференции «Радиофизика». – М., 2004. – С. 527.
2. Грунская, Л. В. Повышение достоверности спектральной оценки, получаемой с помощью корреляционного квадратурного приёмника / Л. В. Грунская [и др.] // Проектирование и технология электронных средств. – 2004. – Спец. вып. – С. 66 – 71.
3. Грунская, Л. В. Экспериментальные и теоретические исследования вариаций напряженности электрического поля, обусловленных солнечными и лунными приливами в приземном слое атмосферы / Л. В. Грунская, В. Н. Морозов // Известия вузов. Физика. – 2005. – № 8. – С. 33 – 39.
4. Грунская Л. В. Лунно-солнечные приливы в электрическом поле атмосферы Земли / Л.В. Грунская, В.Н. Морозов // Известия вузов. Физика. – 2003. – № 12. – С. 71 – 77.

Д.Я. Данченко

Владимирский государственный университет

О МНОЖЕСТВАХ СУЩЕСТВОВАНИЯ ОЦЕНОК ТИПА МАРКОВА-БЕРНШТЕЙНА ДЛЯ ПРОИЗВОДНЫХ РАЦИОНАЛЬНЫХ ДРОБЕЙ

Изучаются некоторые метрические характеристики множеств, на которых существуют оценки типа Маркова-Бернштейна для производных рациональных функций.

Введение

Пусть K — невырожденный в точку компакт на открытой комплексной плоскости \mathbb{C} .

При $z \in K$ и $s, n=1, 2, \dots$ положим

$$\lambda_n^{(s)}(K, z) = \sup \left\{ \frac{|R^{(s)}(z)|}{\|R\|_{\mathbb{C}(K)}} : R \in R_n(K) \right\},$$

где через $R_n(K)$ обозначен класс рациональных функций $R(z)$ степени n , полюсы которых не лежат на K . В отличие от многочленов, производные которых оцениваются на всем связном компакте K через их степень, максимум модуля на K , диаметр K и порядок производных (неравенства Бернштейна, Маркова и различные их обобщения), на любом компакте K можно указать

точку z такую, что $\lambda_n^{(s)}(K, z) = \infty$ при всех натуральных s и n [1], [2].

Оценки производных рациональных функций $R \in R(K)$ на подмножествах компакта K получены в работах А.А. Гончара и Е.П. Долженко [1]-[4]; для этого были разработаны различные методы построения исключительных множеств $E(R, \varepsilon) \subset \mathbb{C}$ со сколь угодно малой мерой $\varepsilon > 0$ таких, что

$$\sup \{ |R^{(s)}(z)| : z \in (K \setminus E(R, \varepsilon)) \} \leq A(n, s, \varepsilon) \|R\|_{\mathbb{C}(K)} \quad (1)$$

с некоторой конечной величиной $A > 0$, зависящей только от указанных аргументов. Заметим, что исключительное множество $E(R, \varepsilon)$ зависит от рациональной функции R , т.е. оценка (1) имеет индивидуальный характер. Может оказаться, что не существует такого "универсального" исключительного множества E , для которого оценка (1) верна в классе всех функций $R \in R_n(K)$ (см. пример 2). В связи с этим возникает вопрос, в

каких именно точках компакта K конечны величины $\lambda_n^{(s)}(K, z)$.

Пусть $z \in K$ и $s > 0$. Назовем s -пористостью компакта K в точке z величину ([5]

$$\omega_s(K, z) = \sup \{ \rho(\zeta, K) |\zeta - z|^{-s-1}, \zeta \in \mathbb{C}(K) \},$$

где $\rho(\zeta, K)$ — эвклидово расстояние от ζ до K . В терминах s -пористости в работе [5] получен следующий критерий существования оценки типа Маркова-Бернштейна:

при фиксированных $s \in \mathbb{N}$ и $z_0 \in K$ справедлива эквиваленция

$$\lambda_n^{(s)}(K, z_0) < \infty \quad (n=1, 2, \dots) \Leftrightarrow \omega_s(K, z_0) < \infty. \quad (2)$$

Кроме того, при выполнении условия $\omega_s(K, z_0) < \infty$ имеем точные по порядку оценки [5]

$$\lambda_n^{(s)}(K, z_0) \leq 50s! \omega_s(K, z_0)(n+1), \quad n=1, 2, \quad (3)$$

Отметим, что обратные теоремы рациональной аппроксимации могут иметь содержательные заключения о локальных дифференциальных свойствах приближаемых функций только в точках с конечной s -пористостью. Например, в [6] показано, что условие $\lambda_n^{(s)}(K, z_0) < \infty$ является необходимым для асимптотической (относительно K) моногенности в точке $z_0 \in K$ функций, достаточно быстро приближаемых на K рациональными дробями.

2. О мере множеств существования оценок

Положим $K^{(s)} := \{z: z \in K, \omega_s(K, z) < \infty\}$.

Как видно из (2) и (3), при натуральном s подмножество $K^{(s)} \subset K$ состоит из тех и только тех точек z_0 , в каждой из которых существует оценка типа Маркова-Бернштейна (3) для производных $R^{(s)}(z_0)$, $R \in R_n(K)$. В данном пункте получены оценки мер Хаусдорфа множества $K^{(1)}$ в случае, когда K является связным компактом, т.е. континуумом.

Обозначения. Всюду ниже через K обозначается произвольный фиксированный ограниченный континуум на открытой комплексной плоскости S . Через u_k , $k=0,1,\dots$, обозначаются непересекающиеся односвязные области, являющиеся компонентами дополнения к K . Будем для определенности считать, что u_0 является неограниченной областью. Внешней границей $\partial_0 K$ континуума K называется объединение границ ∂u_k всех компонент u_k . Через mes_α обозначается внешняя α -мера Хаусдорфа множества e

$$mes_\alpha e = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} (\inf \sum \text{diam}(\delta_j)^\alpha),$$

где \inf берется по счетным покрытиям множества e кругами δ_j с диаметрами $\text{diam}(\delta_j) \leq \varepsilon$.

Сформулируем и докажем результат из работы автора [6].

Теорема 1. Пусть $mes_1 \partial_0 K < \infty$. Тогда $mes_2 K \setminus K^{(1)} = 0$.

Примечание 1. Условие конечности *периметра* $mes_1 \partial_0 K$ для заключения теоремы по существу (см. п. 3, пример 2). Различные обобщения теоремы 1 получены О.Н. Косухиным в его диссертации [7], где найдены метрические характеристики массивности множеств $K^{(s)}$ при любых натуральных s . Приведем один результат О.Н. Косухина. Обозначим через r_k внут-

ренний радиус компоненты u_k , $k \geq 1$, а через n_k – наименьшее число кругов радиусом $\sqrt{r_k}$, которыми можно покрыть границу ∂u_k . Тогда из условий $mes_2 \partial_0 K = 0$ и $\sum_k n_k r_k < \infty$ следует, что $mes_2 K \setminus K^{(1)} = 0$.

Примечание 2. Хорошо известно [8], что условие $mes_1 \partial_0 K < \infty$ является достаточным для несовпадения $S(K)$ и алгебры $R(K)$ (состоящей из непрерывных функций, допускающих сколь угодно точную равномерную аппроксимацию на K рациональными функциями). Этот факт согласуется с теоремой 1, поскольку именно на множестве $K^{(1)}$ гарантируются определенные дифференциальные свойства приближаемых функций [6]. Отметим, что множество $K^{(1)}$ может содержать точки множества *пика* P алгебры $R(K)$, хотя в теории рациональных аппроксимаций наличие таких точек является определенным признаком "разреженности" множеств и, следовательно, расширения класса аппроксимируемых функций. Например, по теореме Бишопа [6], если $mes_2 K/P = 0$, то $R(K) = S(K)$. То, что множество $K^{(1)}$ может содержать точки пика, следует из результата А.А. Гончара [8]: точка $z \in K$ является точкой пика, если $\limsup_{r \rightarrow 0} d(r)/r = a(z) > 0$, где $d(r)$ – точная верхняя грань диаметров пересечения компонент множества $\partial_0 K$ с кругом $|\xi - z| < r$.

Очевидно, для точек $z \in K^{(1)}$ возможно даже равенство $a(z) = 1$.

Доказательство теоремы 1. Пусть $L = mes_1 \partial_0 K$, $d := \text{diam } K < \infty$. Фиксируем $M > 0$ и точку $z \in K \setminus K^{(1)}$, так что $\omega_1(K, z) = \infty$. Тогда существует последовательность кругов $\delta_m(z)$ ($m=1,2,\dots$) с центром в точке z и радиусами $r_m(z) < d/2$, монотонно убывающими к 0 при $m \rightarrow \infty$, и последовательность

точек $\xi_m(z) \in \partial \Delta_m(z)$ таких, что

$$\rho(\xi_m(z), K) \geq \text{Mr}_m^2(z), \quad m=1,2,\dots \quad (4)$$

Совокупность кругов $\Delta_m(z)$ по всем точкам $z \in K/\mathbb{K}^{(1)}$ и по всем номерам m образует покрытие в смысле Витали множества $K/\mathbb{K}^{(1)}$. По теореме Витали из этой совокупности можно выделить не более чем счетный набор непересекающихся кругов

$$\Delta_k = \Delta_{m_k}(z_k) \quad \text{такой,} \quad \text{что}$$

$$\text{mes}_2((K \setminus K^{(1)}) \setminus \bigcup_k \Delta_k) = 0. \quad \text{Положим}$$

$$t_k = \xi_{m_k}(z_k). \quad \text{Легко видеть, что при всех } k$$

$$\text{имеем } \rho(t_k, K) \leq l_k := \text{mes}_1(\partial_0 K \cap \Delta_k). \quad \text{В самом деле, из условия связности (континуума) } K$$

и неравенства $\rho_k = r_{m_k}(z_k) < d/2$ следует, что на границе круга Δ_k лежат некоторые точки K . Следовательно, если s_k – ближайшая к t_k точка континуума K , лежащая на прямолинейном отрезке $[t_k, z_k]$, то

$$\rho(t_k, K) \leq |t_k - s_k| \leq l_k. \quad \text{Отсюда из (4) для радиусов } \rho_k$$

кругов Δ_k получается оценка $\rho_k^2(z) \leq l_k/M$. Значит, $\sum_k \rho_k^2(z) \leq L/M$. Поскольку число M можно выбрать сколь угодно большим, то отсюда следует заключение теоремы 1.

3. Примеры

1-й Пример. счетного компакта K такого, что точка $z_0 = 0$ принадлежит всем множествам $K^{(s)}$, $s \in \mathbb{N}$, и, следовательно, в точке z_0 существуют оценки (3) производных всех порядков.

В кольцах $2^{-k} \leq |z| \leq 2^{-k+1}$, $k = 1, 2, \dots$, расположим множества E_k , состоящие из конечного числа точек, так, чтобы $\omega_s(E_k; 0) \leq 1$ при $s \leq k$. Тогда искомым компактом является $K = \{0\} \cup \bigcup_{k=1}^{\infty} E_k$. Этот

пример показывает, что в таких терминах как α -мера, или емкость критерий существования оценок получить нельзя.

2-й Пример ограниченного континуума K , имеющего бесконечный периметр и положительную площадь и для которого $K^{(1)} = \emptyset$. (Следовательно, нигде на K не существует оценок типа Маркова-Бернштейна.)

Континуум K построим в виде $K = [0, 1/2] \cup \{E \cdot e^{it} : t \in (0; 2\pi)\}$, где E – множество канторовского типа, которое строится следующим образом. На первом шаге из отрезка $[0, 1/2]$ удалим

концентрический с ним интервал длины δ_0^2 , где $\delta_0 = 1/2$. Останется замкнутое множество e_1 первого ранга, состоящее из 2 отрезков

длины $\delta_1 = 2^{-1}(\delta_0 - \delta_0^2)$. На втором шаге из каждого отрезка множества e_1 удалим концентрический с ним интервал длины $2\delta_1^2$. Останется замкнутое множество e_2 2-го

ранга, состоящее из 2^2 отрезков длины $\delta_2 = 2^{-1}(\delta_1 - 2\delta_1^2)$. И так далее. На шаге k из каждого отрезка множества e_{k-1} удалим концентрический с ним интервал длины $k\delta_{k-1}^2$. Останется замкнутое множество e_k k -го ранга, состоящее из 2^k отрезков

длины $\delta_k = 2^{-1}(\delta_{k-1} - k\delta_{k-1}^2)$.

Положим $E = \bigcap_k e_k$ и покажем, что $\text{mes}_2 K > 0$ или, что то же самое, $\text{mes}_1 E > 0$. Достаточно показать, что $\Delta_k := \text{mes}_1 e_k \geq A > 0$ с некоторой постоянной A , не зависящей от k . По построению имеем $\delta_k < 2^{-k-1}$ и

$$\Delta_k = 2^k \delta_k = 2^{k-1} (\delta_{k-1} - k\delta_{k-1}^2) = \Delta_{k-1} (1 - k\delta_{k-1}) > \Delta_{k-1} (1 - k2^{-k}) >$$

$$> \Delta_{k-2} (1 - k2^k) (1 - (k-1)2^{k-1}) > \dots > \Delta_1 \prod_{m=2}^k (1 - m2^m) \geq A > 0 \quad (5)$$

Покажем теперь, что $\omega_1(K; z) = \infty$. Для этого достаточно установить, что при любом $x_0 \in E$ имеем

$$\tilde{\omega}_1(E, x_0) = \sup\{\rho(x, E) | x - x_0 |^{-2} : x \in \mathbb{R} \setminus E\} = \infty \quad (6)$$

Пусть $x_0 \in e_k$. Тогда x_0 лежит на одном из составляющих множество e_k отрезков длины $2^{-1}(\delta_{k-1} - k\delta_{k-1}^2)$. Этот отрезок граничит с некоторым интервалом, исключенным из e_{k-1} на шаге k . Длина этого интервала равна $k\delta_{k-1}^2$, поэтому, если точка x — его середина, то

$$\frac{\rho(x, E)}{|x - x_0|^2} \geq \frac{k}{2} \frac{\delta_{k-1}^2}{(\delta_{k-1} - k\delta_{k-1}^2)^2} = \frac{k}{2} \frac{1}{(1 - k\delta_{k-1})^2} > \frac{k}{2}.$$

Поскольку $x_0 \in e_k$ при всех k , то отсюда следует (6).

Библиографический список

1. Гончар, А. А. О наилучших приближениях рациональными функциями / А.А. Гончар // ДАН СССР. 1955. Т. 100. – С. 205 - 208.
2. Долженко, Е. П. Некоторые точные интегральные оценки производных рациональных и алгебраических функций. Приложения / Е.П. Долженко // Analysis Mathematica. 1978. Т. 4. N 4. P. 247-268.
3. Гончар, А. А. Обратные теоремы о наилучших приближениях рациональными функциями /

А.А. Гончар // Изв. АН СССР. Сер. математика. 1961, Т. 25. – С. 347-356.

4. Долженко Е. П. Дифференциальные свойства функций и некоторые вопросы теории приближений : дис. канд. физ.-мат. наук / Е.П. Долженко. М., МГУ, 1960.– 128 с.

5. Данченко, В. И. Один критерий существования оценки производной рациональной функции / В.И. Данченко // Математические заметки. – 2005. – Т. 78. – № 4. – С.493 - 502.

6. Данченко, Д. Я. Некоторые вопросы аппроксимации и интерполяции рациональными функциями. Приложение к уравнениям эллиптического типа: дис... канд. физ.-мат. наук / Д.Я. Данченко. Владимир, ВГПУ, 2001. – 116 с.

7. Косухин, О. Н. О некоторых нетрадиционных методах приближения, связанных с комплексными полиномами : дис... канд. физ.-мат. наук. / О.Н. Косухин -М.: МГУ, 2005. – 78 с.

8. Гамелин, Е. Равномерные алгебры / Е. Гамелин. М.: Мир, 1973. – 334 с.

А.А. Кузнецов, А.В. Гуцин

Владимирский государственный университет

СТРУКТУРНО-ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ДИАГРАММ СИГНАЛОВ

Приведена технология последовательного дифференцирования диаграмм непрерывных сигналов (ДНС). Проведен сравнительный параметрический анализ дифференциальных рядов (ДР), полученных по исходным реальной и виртуальной ДНС. Показано, что каждый член ДР степени i содержит информацию о соседних членах исходного ряда ДНС количеством i . С определенного значения i топологическая структура диаграмм ДР качественно не меняется. Выделенная связь между членами ряда исходной ДНС длиной i отсчетов объясняется наличием последовательно «подключаемых» независимых регуляторных механизмов.

Ключевые слова: диаграмма непрерывного сигнала (ДНС), дифференциальный ряд (ДР), топологическая структура, регуляторные механизмы.

Введение

Исследование физического процесса начинается с того, что экспериментатор с неизбежностью переводит непрерывный физи-

ческий процесс в его дискретный аналог в форме цифрового ряда, который характеризуется шагом дискретизации. Поэтому на диаграмме непрерывного сигнала (ДНС) лю-

бой природы значения регистрируемого параметра распределены по фиксированным ярусам [1]. Алгоритмическую информацию о микропереходах на ярусной ДНС должна содержать дифференциальная ДНС (дДНС). Цифровой ряд дДНС, полученный конечно-разностным методом, представляет ряд величин пошаговых скоростей изменений RR -интервалов или микропереходов между соседними отсчетами. Если продлить эту логику и составить цифровые ряды дДНС с возрастающей степенью i производной, то вероятно получить информацию о скрытой внутренней динамике формирования макроструктуры ДНС.

Цель работы - исследование ярусной ДНС и ее дифференциальных рядов (ДР) для определения общих закономерностей ее формирования.

Дифференциальные диаграммы непрерывного сигнала

На ярусной ДНС координатная точка совершает последовательные сложные дискретные движения около среднего значения параметра X . Вертикальное движение разворачивается по горизонтальной оси номеров отсчета n . Результатом разложения функциональной зависимости $X(n)$ вертикального движения координатной точки на плоскости ДНС в ряд Тейлора около среднего значения является степенной знакопеременный ряд: $X(n) = X_0 - X_1 n + X_2 n^2 - \dots \pm X_k n^k$. Здесь X_0 – выборочное среднее значение (X_{cp}), $X_i n^i$ – величины аддитивного отклика реализации процесса на влияния со стороны регуляторных механизмов.

Начиная со второго акта дифференцирования, возникают трудности не только в трактовке получаемых результатов, но даже в определении получаемых объектов. ДНС представляет последовательность значений физического параметра на диаграмме, а дДНС – последовательность величин микропереходов между ярусами. Для сохранения смысла термина необходимо при формировании дДНС пользоваться не последова-

тельной процедурой разностей соседних значений микропереходов, а процедурой их суммирования. Только в таком случае можно получить цифровой ряд величин микропереходов при шаге отсчета, равном 2.

Последующая подобная процедура приведет к формированию цифрового ряда величин микро-переходов при шаге отсчета, равном 4 и т.д. При этом получают цифровые ряды, которые адекватны термину дДНС, но с разным шагом отсчета и соответственно уменьшающимся размером. Такая технология формирования дДНС с растущим шагом дискретизации позволяет исследовать определенные шагом отсчета межъярусные связи.

Иными словами, указанная последовательность элементарных процедур суммирования является простейшим технологическим фильтром высоких частот. Очевидно, что в результате применения этой технологии после k -й процедуры суммирования на графике дДНС выделяются долгопериодические составляющие процессы.

Дифференциальные ряды

Если же последовательно применять процедуру дифференцирования ярусного объекта конечно-разностным методом, то последующие объекты, начиная со второго акта, не могут быть обозначены как дДНС, так как приобретают иной смысл. Первый из них ($i = 2$) представляет цифровой ряд последовательных разностей между соседними величинами микропереходов на ДНС. Далее ($i > 2$) члены получающихся дифференциальных рядов (ДР) представлены последовательными разностями соседних пар членов предыдущего цифрового ряда со значением i , меньшим на 1.

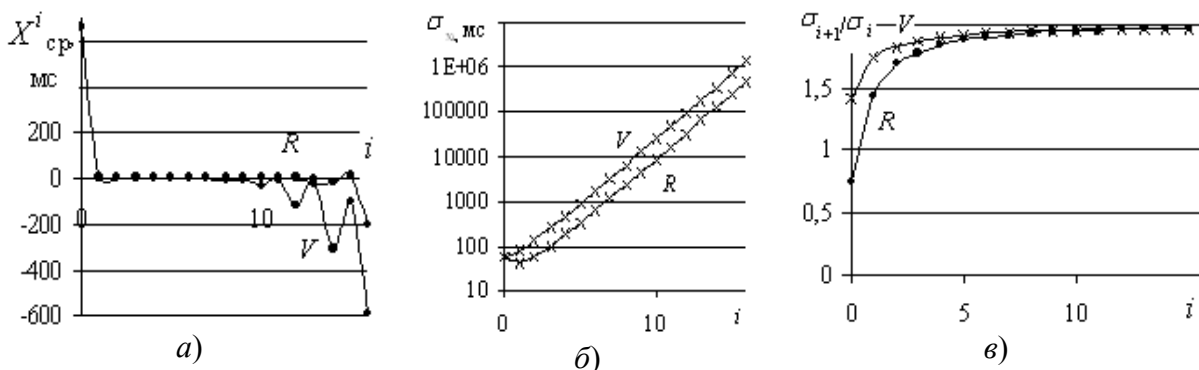
По 18 последовательно примененных процедур дифференцирования исходной ДНС получено 18 цифровых рядов $X^{(i)}(n)$. Для сопоставления результатов использовалась виртуальная ДНС (вДНС, или V), полученная генерацией случайных чисел по нормальному закону с параметрами объема выборки, дисперсии и среднего значения ре-

альной ДНС (или R) и представляющая эталонный «неуправляемый процесс».

Каждый цифровой ряд исходной ДНС и ДР характеризовался средним значением $X_{\text{ср}}$, стандартным отклонением σ_X , пошаговым отношением σ_{i+1}/σ_i . При степени $i = 0 - 1$ функция $X_{\text{ср}}^{(i)}(i)$ сильно меняет качество (рис. а). При этом изменение функции $\sigma(i)$ для R и V противоположное. При $i > 2$ все функции ведут себя качественно одинаково так что при сдвиге влево на шаг $i = 2$ кривой R графики кривых (R и V) практически

совпадают (рис. а – в).

Авторы полагают, что при росте i каждая последующая ДР «включает» прямую информацию о последующем уровне регуляции (управления) в их иерархии, но исключает информацию о предыдущем уровне. Вероятно, рост величины i аналогично открытию «замков» системы регуляции и управления ритма сердца. Количество замков (размерность m) определяет число действующих контрольно-регуляторных механизмов.



Функциональные параметры ДР вДНС (V) и ДНС (R)

Выводы

В рамках такого представления размерность m оценивается числом $i = 8 - 9$, при которой «исключается» принципиальная возможность проявления работы механизмов внешней регуляции, так как базовая динамика меняет свое качество от шума Гаусса – к броуновскому движению. В этом смысле шум Гаусса определяет «форму» хаотической составляющей и является динамической базой процессов контроля, регуляции и управления. Для процесса, характеризующего шумом Гаусса, превалируют неограниченные дальние связи между отсчетами (механизмы контроля) и слабое участие ближних связей (механизмы регуляции и управления).

Броуновское движение определяет «очищенную форму» хаотической составляющей. Для процесса броуновского движения

характерно полное отсутствие ближних и дальних связей между отсчетами.

Для процесса детерминированного хаоса превалируют ограниченные переменные связи между отсчетами, определенные влиянием того или иного механизма контроля, регуляции и управления. Количество соседей, «цепляемых» данным значением, может служить мерой m детерминизма ритма сердца. При росте i происходит последовательная потеря детерминизма.

Библиография

Кузнецов, А. А. Методы анализа и обработки электрокардиографических сигналов: Новые подходы к выделению информации: монография / А. А. Кузнецов – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та. 2008. – 140 с.

Н. Г. Конопасов, А. А. Кузнецов, В. Н. Кунин
Владимирский государственный университет

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВИХРЕВЫХ КОЛЕЦ В СВОБОДНОЙ АТМОСФЕРЕ

Приводятся результаты экспериментов по генерации вихревых колец в свободной атмосфере при работе тепловой установки метеотрон на импульсном режиме подачи топлива. Исследование структуры и взаимодействия вихревых колец проводилось по данным визуальных наблюдений и записям кинокамеры. Определены основные структурные и динамические элементы вихревых колец. Приведено описание их последовательного вариативного взаимодействия. Предложены физические механизмы их взаимодействия. Ключевые слова: вихревое кольцо, структура, взаимодействие, вихревая трубка тока.

Введение

При работе метеотрона III [1] в режиме импульсной подачи топлива на центробежную форсунку формируется вихрь шаровидной формы со сложной ячеистой структурой конвективного теплообмена (рис. 1, 20 – 50). В течение первых 2 с в вихре происходит горение топлива, и вихрь ускоряется до максимальной скорости всплытия 8–10 м/с, а затем движется замедленно, трансформируясь в вихревое кольцо (ВК). Без начальной закрутки возможна лишь генерация дымовых колец с малым временем жизни. Изучение эволюции вихря производилось по кинограммам [1], снятым со стационарных точек камерой «Красногорск» со скоростью 24 кадра в секунду. На рис. 1 показаны последовательные стадии организации ВК. Цель работы – исследование структуры и взаимодействия вихревых колец в свободной атмосфере

Экспериментальное исследование структуры вихревых колец

При формировании ВК присоединенная масса воздуха с сажевыми частицами непрерывно генерируется в ядро вихря из «следа» с расстояния около одного диаметра ВК (рис. 2), и оно поднимается при отрицательной реактивной силе. Переменная напряженность замкнутой формы ВК при поступательном вертикальном движении порождает поперечную волну по периметру формирующегося ВК, которая трансформируется в локальные элементы формы кольца – «рукава» и «бусины».

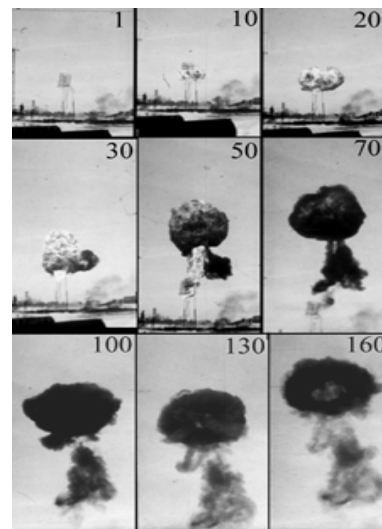


Рис. 1. Компьютерная версия кадров кинограммы одного опыта. Цифры на кадрах обозначают их номера. Высота установки 5 м (кадр 1)



Рис. 2. Подъем вихревого кольца в свободной атмосфере. Изображение пастеризованное

На рис. 2, 3 приведены компьютерные версии двух фотографий вихревого кольца, выполненных сбоку и снизу. Процедура пастеризации изображения позволила контрастно выделить контуры сажевого конуса («хвоста»), следа и области наиболее сильного задымления. Сформированное ВК состоит из четырех структурных фрагментов: вихревой трубки, «рукава», «бусин» и следа. «Рукав» и «бусина» по вихревому кольцу не перемещаются. «Рукав» формируется с подветренной стороны, находится в наиболее задымленной области и представляет собой фрагмент вихревой трубки с распределенным по нему утолщением плотного задымления. Этот фрагмент наименее охотно поддается деформации и при распаде ВК исчезает в последнюю очередь.

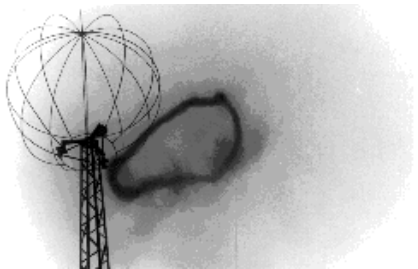


Рис. 3. Вид снизу вихревого кольца на высоте 50 м на фоне сажевого конуса. Масштаб задан калибровочным шаром диаметром 3 м на высоте 15 м

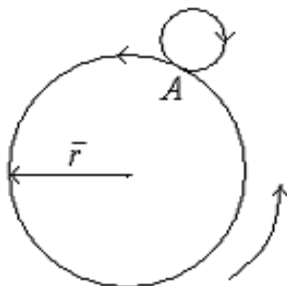


Рис. 4. Схема осевых циркуляционных течений в ВК и «бусине»

Местоположение «бусины» визуально определяется локальным утолщением вихревого кольца. «Бусина» представляется перехлестом (малой петлей) на поверхности тора с обратным круговым течением (рис. 3, 4). Это позволяет кольцу избавиться от поперечной волны и обрести гладкую нена-

пряженную форму. Петли, выполняя компенсационную роль, позволяют вихревому кольцу «натянуться» по оптимальному данным условиям контуру. В месте «перехлеста» (т. А) линии тока перекрещены так, что линии тока выходят наружу (рис. 4). Закрутки по направлению вокруг центров противоположные, но направления как осевых, так и меридиональных течений в точке контакта одинаковые. Это приводит к результирующему отталкиванию кольца «бусины» из динамической структуры ВК [1].

В отличие от дымного кольца ВК имеет сложную газодинамическую структуру. Поверхность тора ВК охватывает определенное количество сложно-взаимодействующих узких замкнутых вихревых трубок тока (ВТТ). В конечном итоге остается одна единственная ВТТ. Такая вихревая трубка практически незаметно генерирует в окружающую среду сажевые частицы, очень устойчива и упруго деформируется в отличие от «рукава». Она может относительно долго «висеть на одном месте», сильно искривляться без потери слитности вихря и менять ориентацию. При росте диаметра трубка растягивается, утончается и рассеивается.

Динамические характеристики ВК

Переход от непрерывного потока с конденсированной дисперсной фазой к дискретному (вихреобразованию) означает рождение качественно новой динамической структуры, обладающей информацией, не свойственной непрерывному «сплошному» потоку. Вихревое кольцо имеет три системных течения, характеризующиеся центральной вертикальной скоростью v_c , угловой скоростью ω_c течения по осевой окружности и угловой скоростью ω_m закрутки по меридианам тора. Таким образом, динамика вихревого кольца характеризуется соответственно центральным вектором импульса \vec{P}_c и двумя векторами моментов импульсов: экваториальным \vec{L}_y и меридиональным \vec{L}_z .

Кроме этого есть внутривидовые регуляторные динамические характеристики: переменный убывающий импульс «следа»,

количество ВТГ, наличие «бусин» и «рукавов» и т.д. Такая устойчивая динамическая система может поступательно перемещаться более или менее охотно в любых направлениях или зависать.

Вырождение ВК в дымное кольцо (ДК) происходит при исчезновении \vec{L}_3 и вырождении гироскопического эффекта. ДК может поступательно перемещаться лишь при наличии \vec{p}_y положительной плавучести или фиксироваться в статичном состоянии, например, на расстояниях не более диаметра кольца под протяженной горизонтальной плоскостью, что не раз наблюдалось автором в лабораторных экспериментах [2, 3] при генерации ДК пушкой Вуда.

Экспериментальное исследование взаимодействия вихревых колец в свободной атмосфере. Игра или объединение вихревых колец

В спокойной атмосфере может произойти явление, называемое «чехардой», или игрой вихрей [4]. Первый сгенерированный вихрь набирает небольшую высоту (около 10 м). Трансформируясь в ВК и охлаждаясь, медленно теряет вертикальную составляющую скорости. Вихрь в форме ВК теряет всякую связь с источником, а с процессом генерации его связывает только динамика его физических параметров.

Второе ВК2, сгенерированное таким же образом и с такими же параметрами, следует за первым и захватывается течением присоединенного воздуха с направлением против градиента давления в области «следа» ВК1. При этом ВК2 приобретает и горизонтальную составляющую скорости, благодаря чему относительное расположение обоих вихревых колец становится поэтажным (рис. 5).

Осевые частицы ВК2 охотно откликаются на отрицательный градиент давления в структуре «следа» кольца 1 и приобретают положительное ускорение. Таким образом, «след» ВК2 «выворачивается наизнанку» и ВК2, теряя структуру, втягивается за этот «хвост» в центральное ядро ВК1. Далее происходит второе рождение ВК2. Родителем

его является ВК1. Именно он генерирует новое вихревое кольцо, выступая в качестве газодинамической пушки с начальной закруткой присоединенной массы. Очевидно, что газовая динамика вновь рожденного вихря должна быть такой, как у родителя.

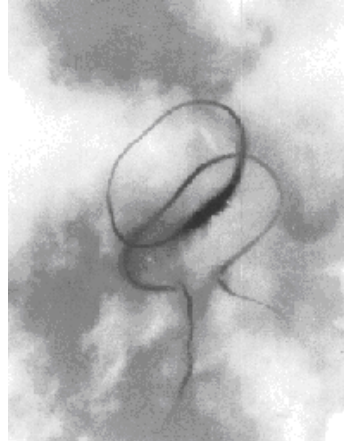


Рис. 5. Контакт и объединение пары ВК2, ВК3 во время «чехарды» ВК1 - ВК2

Теперь уже первое вихревое кольцо оказывается в «следе» кольца 2 и таким точно образом проскакивает сквозь ядро второго. Во всех случаях такого взаимодействия базовый вихрь перед и во время акта игры как бы объединяется со вторым – играющим – в общую динамическую структуру. Перед актом игры они движутся с одной горизонтальной скоростью как единое целое, представляя собой замкнутую ячейку циркуляции. Процессы, происходящие внутри нее, определяются как игра вихрей.

Если оси двух вихревых колец параллельны, но сдвинуты и расходятся на $\Delta L > R$, то ядро догоняющего ВК2 не попадает в зону пониженного давления «следа» ВК1. При благоприятных условиях кольца сближаются. Процесс сближения трактуется автором как притяжение, так как визуально отчетливо видна характерная деформация фрагмента ВК2. Догоняющее второе вихревое кольцо приближается к первому снизу сбоку и локально деформируется выступом в сторону догоняемого вихревого кольца. Первое кольцо остается недеформируемым до момента контакта. Встреча двух фрагментов динамических структур колец заканчивается полным локальным исчезновением контак-

тирующих фрагментов (см. рис. 5). Так как при этом объединяются и осевые, и меридиональные течения вихрей, то резонно предположить, что происходит последовательное объединение пар ВТТ.

Механизм объединения вихревых колец имеет обязательную составляющую – компенсацию циркуляционных вкладов в зоне контакта. При боковом фрагментарном объединении осевая скорость частиц в синтезированном ВК (СВК) падает в $\sqrt{2}$ раз, и СВК теряет гироскопическую устойчивость.

Фрагменты СВК, близкие к области контакта, при объединении порождают менее интенсивную динамику. Эти участки сильно растянуты, не имеют «бусин». Новое динамическое образование (СВК) охотно деформируется, локально рассеивается, оставляя в поле наблюдения лишь отдельные задымленные структурные фрагменты - «рукава». По визуальным наблюдениям время жизни СВК не превышало 30 с. Наиболее устойчивым и долгоживущим является отдаленный от контакта участок ВК1. Описанное явление очень капризное в получении в реальных натуральных условиях с поперечным сдвигом и не подчиняется существующему утверждению [4], что время жизни вихревых колец пропорционально их диаметру.

Обсуждение результатов

Составляющие вихревое кольцо ВТТ имеют одинаковый вектор \vec{L}_y , поэтому отталкиваются в горизонтальной плоскости. Каждая из них обладает одинаковым вектором \vec{L}_1 , поэтому в меридиональном сечении зоны контакта двух ВТТ их векторы импульсов противоположны. Этот механизм взаимодействия приводит к их притяжению. Таким образом, имеются два конкурентных механизма: один (осевой) препятствует объединению структурных трубок тока, второй (меридиональный) способствует их объединению. Вероятно, каждой паре ВТТ разрешены интервалы времени как для объединения, так и для отталкивания.

Интенсивная начальная закрутка приво-

дит к превалированию первого механизма. Трубки тока ведут непрерывную чехарду, и при непрерывном относительном росте влияния второго механизма в конечном итоге остается одна ВТТ. В рамках системного конкурентного механизма рост диаметра является интегральным системным параметром газодинамической активности ВК. Собственная внутренняя динамика («чехарда») замкнутых ВТТ с одинаковой циркуляцией импульса позволяет вихрю сохранять радиальную упругость структуры ВК и газодинамическую активность продолжительное время. Вероятно, количество ВТТ, определяющая устойчивость и упругость формы ВК, находится в прямой зависимости с временем его жизни.

При боковом фрагментарном контакте двух вихревых колец в одной горизонтальной плоскости встречаются однонаправленные меридиональные и разнонаправленные осевые течения. На небольшом интервале времени память о начальной закрутке сохраняется в виде скорости v_0 по осевой окружности, и объединение ВК происходит естественно и охотно (положительное динамическое средство). При этом меридиональный механизм препятствует быстрому падению величины v_0 . Положительное динамическое средство в одинаковых условиях генерации показывает предпочтение ВК к соединению. В рамках предложенной модели разделение ВК представить затруднительно. Даже отделение «бусины» по совокупности наблюдений относится к редким событиям.

Выводы

Приведенные экспериментальные факты объясняют и шахматное расположение вихрей в «дорожке Кармана» и не противоречат предположению Л.Д. Ландау о формировании и развитии крупномасштабной турбулентности за счет мелкомасштабной [5]. По описанному механизму взаимодействия большие вихри и турбулентные струи «питаются» энергией малых вихрей и струй, а система малых вихрей обретает качество динамического аккумулятора энергии за-

вихренности. Осесимметричная нагретая струя может быть определена суперпозицией разномасштабных термик в форме ВК.

Библиографический список

1. Кузнецов, А. А. Экспериментальные исследования кольцевых вихрей продуктов сгорания в свободной атмосфере / А.А. Кузнецов, Н.Г. Конопасов // Физика аэродисперсных систем. – № 43. – Одесса: ОНУ, 2006. – С. 100 – 106.

2. Кунин, В.Н. Эксперименты по получению устойчивых тороидальных плазменных образований при атмосферном давлении / В.Н. Кунин [и др.] // Вопросы низкотемпературной плазмы и магнитогидродинамики. –

Рязань: РРТИ, 1978. – С. 5 – 36.

3. Кузнецов, А.А. Производство и исследование шароидов электромагнитной природы в свободной атмосфере / А.А. Кузнецов, Л.В. Фуров // Физика аэродисперсных систем. № 43. – Одесса: ОНУ. 2006. – С. 131-136.

4. Лэмб, Г. Гидродинамика / Г. Лэмб; под ред. Н.А. Слезкина, пер. с англ. А.В. Гермогенова и В.А. Кудрявцева. – М; Л.: ОГИЗ, Гостехиздат, 1947. – С. 929.

5. Ландау Л. Д. К проблеме турбулентности / Л.Д. Лаудау // Докл. АН СССР, Сер. Гидродинамика. – Т. 44, № 8, 1944. – С. 339 – 342.

**А.А. Антипов, С.М. Аракелян, С.В. Кутровская,
А.О. Кучерик, Д.С. Ногтев, В.Г. Прокошев**
Владимирский государственный университет

ФОРМИРОВАНИЕ ПРОТЯЖЕННЫХ МАССИВОВ НАНОСТРУКТУР ПРИ ОСАЖДЕНИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦ ИЗ КОЛЛОИДНЫХ РАСТВОРОВ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Приведены результаты исследований по осаждению однокомпонентных и двухкомпонентных коллоидных систем при локальном лазерном нагревании. Действие лазерного излучения влияет на коэффициент диффузии частиц коллоида, что приводит к локальному осаждению в области нагрева на поверхность холодной подложки. Проведенные эксперименты демонстрируют возможность управлением морфологическими свойствами осажденного слоя.

Введение

При формировании тонких металлических покрытий на поверхности различных материалов широкое распространение имеют методы получения тонких пленок из жидкой фазы (электролитов) при помощи лазерного излучения: метод лазерного химического осаждения (LCLD), импульсного лазерного осаждения (PLD), химического парофазного осаждения (LCVD) и др. [1, 3]. Использование данных подходов предполагает осаждение вещества на поверхности различных материалов без специальной обработки их поверхностей, что значительно упрощает технологический цикл.

Дальнейшим развитием данных технологий является использование метода лазерно-

го осаждения металлических наночастиц из коллоидных систем (LDPCS) [4], которые представляют собой устойчивый раствор с равномерно распределенными наночастицами металлов и/или их оксидов. В результате управляемого воздействия импульсно-периодического лазерного излучения (при различных мощностях излучения, частоте следования лазерных импульсов, диаметре лазерного пучка и т.д.) на коллоидный раствор и соответствующей геометрии эксперимента происходит осаждение наночастиц на поверхность подложки с контролируемой толщиной и шириной осажденного слоя – от нескольких сотен нанометров до нескольких микрон.

В данной работе приведены результаты

по управляемому формированию протяженных массивов наноструктур методом LDPCS с целью получения образцов наноструктурированных материалов с заданным распределением осажденных частиц.

Методика эксперимента

На рис. 1 схематично представлен метод лазерного осаждения частиц на поверхность холодной подложки, помещенную в коллоидный раствор.



Рис. 1. Схема воздействия лазерного излучения на коллоидный раствор

В первой серии экспериментов использовался однокомпонентный коллоидный раствор на основе глицерина с добавлением наночастиц оксида меди (CuO) со средним размером 50 нм. Воздействие импульсно-периодического лазерного излучения ($\lambda=1,06$ мкм, частота повторения импульсов 20 кГц, средняя мощность 2 Вт) производилось на подложку из предметного стекла, погруженную в коллоидный раствор; лазерный пучок мог сканироваться вдоль подложки.

Во второй серии экспериментов создавался двухкомпонентный раствор на основе глицерина с добавлением наночастиц никеля (Ni) и неочищенных углеродных нанотрубок. Данная смесь перемешивалась на приборе Ротамикс до однородной консистенции. В полученный раствор помещались различные подложки (стеклянные, медные и кремниевые), на которых получалось осаждение наноструктур. Воздействие производилось импульсно-периодическим лазерным излучением со средней мощностью 2,5 Вт.

Полученные образцы исследовались с помощью растрового электронного микро-

скопа (РЭМ) и методами атомно-силовой микроскопии.

Результаты

Формирование слоя осаждения из наночастиц оксида меди происходило строго по траектории сканирования лазерного пучка с четкой границей осаждения (рис. 2). Размер спекшихся зерен варьируется от 150 до 300 нм.

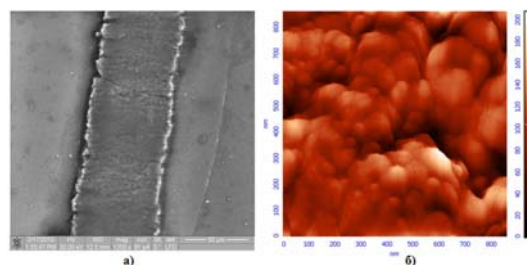


Рис. 2. Исследование морфологии осажденного слоя: а – РЭМ изображение трека осаждения CuO на диэлектрическую подложку; б – АСМ изображение увеличенной области центра трека

Шероховатость поверхности в области центра трека (см. рис. 2, б) составляет в поперечном сечении 25 нм при среднем значении высот 94 нм (максимальная высота – 207 нм). Такое значение шероховатости и вид полученных структур позволяет предположить, что механизм формирования наноструктур связан со спеканием плотноупакованных частиц между собой, вследствие чего на поверхности наблюдаются только сфероподобные структуры (радиусом порядка 25 нм).

Осажденный слой никеля и углеродных нанотрубок на диэлектрической подложке (предметное стекло со шлифом) отличается от осажденного слоя оксида меди на диэлектрической подложке. В этом случае (рис. 3), структура осажденного слоя меняется от центра к периферии: в области непосредственного воздействия лазерного излучения на раствор на поверхности подложки формируются каплеподобные структуры (рис. 3, б), тогда как на границе (20 мкм от центра трека) наблюдаются отдельные конгломераты частиц размерами от 30 до 150 нм (рис. 3, в).

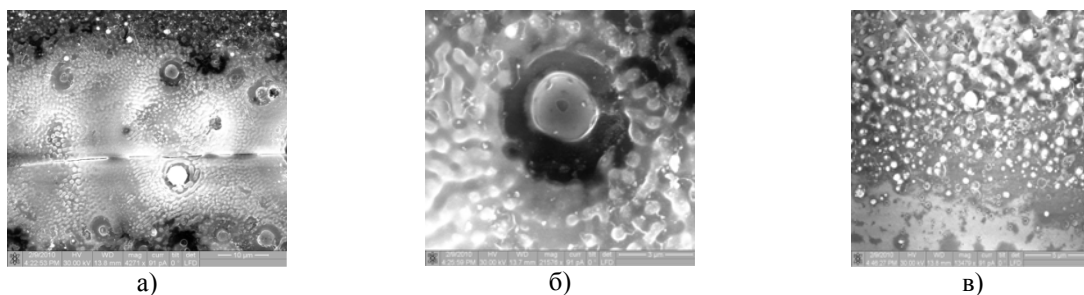


Рис. 3. РЭМ изображения осаждения коллоидной системы из никеля и углеродных нанотрубок на диэлектрическую подложку: а– трек осаждения, б – центр трека, в – периферия трека

При осаждении двухкомпонентного раствора на медную подложку (рис.4) формирование наноструктур происходило строго по траектории сканирования лазерного пучка без разрушения поверхности подложки. Однако после однократного прохода осаждение представляло собой отдельные неосприкасающиеся конгломераты спёкшихся наночастиц. После двух проходов монолитность осажденного слоя значительно повышалась. При этом образуются более гладкие микрообласти осаждения, имеющие границы с соседними областями; размывания области осаждения не происходит. Шероховатость слоя в поперечном сечении составляла 270 нм при высоте рельефа около 2 мкм.

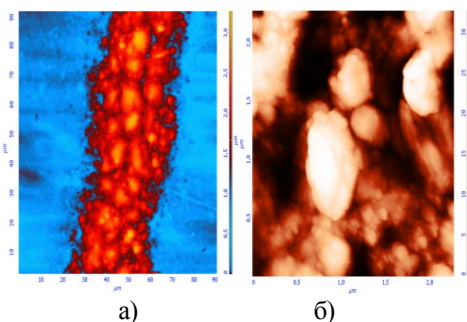


Рис. 4. АСМ – изображения осажденного слоя никеля и углеродных нанотрубок на медной подложке: а - линия осаждения вдоль траектории сканирования лазерного пучка; б - структуры в центре области осаждения

Исследование механизма образования поверхностного осажденного слоя показало, что при локальном лазерном воздействии на коллоидные системы процесс осаждения происходит в две последовательные стадии.

На первой стадии происходит локальный нагрев коллоидного раствора, вследствие

чего у глицерина изменяются вязкость и коэффициент поверхностного натяжения в области лазерного воздействия. Это приводит к интенсивной диффузии частиц никеля в область нагрева. При достижении некой критической массы конгломерат частиц преодолевает действие поверхностного натяжения глицерина и частицы осаждаются непосредственно на поверхность подложки. На второй стадии локальный лазерный нагрев приводит к частичному спеканию наночастиц. Топология образующегося осажденного слоя зависит от типа подложки, которая помещена в коллоидный раствор.

На рис. 5 показан срез (толщиной 10 мкм) поверхности осажденного слоя, полученный на растровом электронном микроскопе с использованием метода FIB-профилирования и его элементный состав (рентгеновский спектр). Видно, что осажденный на медную подложку слой состоит преимущественно из никеля, осевшего на поверхность без ее повреждения (рис.5, а). Рентгеновский спектр осажденной области показал следующее процентное соотношение ее состава: по массе около 12 % никеля и 88 % меди; углеродный пик не фиксировался.

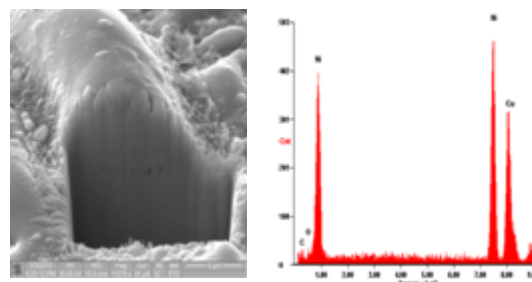


Рис. 5. Срез осажденного слоя никеля (а), рентгеновский спектр зоны среза (б)

Исследование структуры осажденных слоев методами фрактальной геометрии

Ранее выполненные исследования структур, полученных при селективном лазерном спекании порошков металлов в жидкостях, демонстрируют их фрактальную природу [5 - 7]. Поэтому в нашем случае анализ приведенных на рис. 4, 5 осажденных слоев можно провести методами фрактальной геометрии. При этом агрегацию частиц в объеме коллоидного раствора и вблизи поверхности подложки целесообразно описывать с использованием механизмов фрактальной перколяции и обобщенного броуновского движения [7, 8]. Принципиальное значение имеет диффузия частиц вблизи поверхности подложки, которая определяет образование фрактальных структур в зависимости от исходной концентрации частиц. Сам коэффициент диффузии значительным образом изменяется, вблизи фрактальных структур образуя так называемую аномальную диффузию [5, 8].

В общем случае отношение этого фрактального коэффициента диффузии D_f и стандартного (в объеме) D можно описать следующим выражением [8]:

$$D_f = D \left(\frac{a}{L} \right)^\theta, \quad (1)$$

где параметр a – характерный пространственный период осажденной структуры на поверхности подложки, L – некий характерный масштаб фрактальной структуры, θ – фактор аномальной диффузии, который связан с фрактальной размерностью a осажденной структуры соотношением

$$\theta = 2d - 2. \quad (2)$$

Таким образом, вычислив объемный коэффициент диффузии D наночастиц в глицерине и определив фрактальную размерность осажденного слоя, можно проанализировать, каким образом изменяется диффузия в процессе осаждения и как она влияет на структуру осажденного слоя (измерив параметр a осажденной наноструктуры и оценив значение L).

Коэффициент диффузии наночастиц ни-

келя в среде глицерина можно определить по классической формуле Эйнштейна в модели сферических частиц, движущихся в жидкости:

$$D = ukT, \quad (3)$$

где u – коэффициент подвижности диффундирующих частиц, k – постоянная Больцмана, T – температура жидкости. Для сферических частиц коэффициент подвижности можно выразить из закона Стокса как

$$u = \frac{1}{6} \pi \nu r, \quad (4)$$

где ν – коэффициент кинематической вязкости жидкости, r – радиус частицы.

Представленные соотношения приводят к следующей оценке: при нагреве до 100 °С коэффициент диффузии в среде составляет

$D \approx 10^{-16}$ см²/с для частиц с радиусом $r=100$ нм.

Это среднее значение коэффициента диффузии в объеме коллоидного раствора может значительно изменяться при приближении к поверхности подложки с учетом её шероховатости. Учитывая, что изначально поверхность подложек из различных веществ может иметь сильно отличающиеся параметры шероховатости, реально ожидать, существенное изменение структуры осажденного слоя. А учитывая принципиальное свойство фрактального самоподобия, начальная «затравочная» структура поверхности подложки будет определять морфологию осажденного слоя. Необходимо также учитывать конкурирующий процесс термического распада фрактальных структур при лазерном нагреве. Для расчета фрактальной размерности использовались измеренные характерные профили поверхности (рис 6.)

Воспользовавшись определением фрактала как некоторого множества, отдельная часть которого несет в себе (в соответствии со свойством самоподобия) информацию обо всем множестве [9], можно использовать скейлинг-эффект [9 - 11] для непосредственного расчета длины ряда получившихся наноструктур.

Действительно, для многих самоподобных множеств верно соотношение [11]:

$$L(\delta) = L_0 \delta^{1-d}, \quad (5)$$

где L_0 – средняя наблюдаемая по профилю полученной наноструктуры длина ряда, $L(\delta)$ – длина ряда при аппроксимации профиля наноструктуры с шагом δ , d – фрактальная размерность.

Поэтому, измерив полученный при осаждении профиль наноструктур L и проведя процедуру аппроксимации, можно определить значение d .

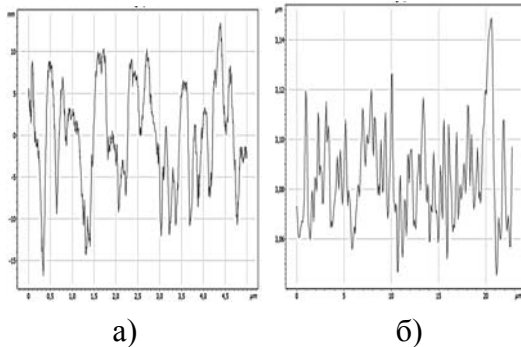


Рис.6 Измеренный профиль осажденного слоя частиц никеля: а - на поверхности меди; б - на поверхности кремния

При этом использовался следующий алгоритм расчета. Из всего массива данных по профилю осажденного слоя (см. рис.6) выбирались 10 % отсчетов, включающих в себя начальную, конечную и промежуточные точки (по длине профиля), которые, в свою очередь, содержат максимальное и минимальное значение (по высоте профиля), расположенные по возможности на равном удалении друг от друга. Для полученных фрагментов кривой рельефа рассчитывалась характерная длина. На следующем этапе в данную выборку добавлялись еще 10 % от общего количества подобных измерений. Для полученной таким образом уточненной кривой рельефа снова рассчитывалась характерная длина. Обсуждаемая последовательность вычислений продолжалась до тех пор, пока получаемые значения длин ряда по профилю осажденной наноструктуры не изменялись.

Таким образом, с каждым расчетным шагом происходила поэтапная аппроксимация искомой кривой рельефа аналогично методу расчета, принятого в задачах определения длины береговой линии [9,10].

Предлагаемый метод был протестирован на известных фрактальных множествах: кривой Коха, пыли Кантора и др.[9 - 11]. Полученные значения фрактальной размерности отличались от аналитически рассчитанных для данных структур не более чем на абсолютную величину 0,05.

Полученные значения фрактальной размерности для результатов наших экспериментов по осаждению наноструктур на подложку показали, что при осаждении на поверхность кремния фрактальная размерность осажденного слоя разных поверхностных зон лежит в интервале $d=1,60 \sim 1,75$; при осаждении на поверхность меди – $1,35 \sim 1,47$.

Воспользовавшись выражением (2), можно определить средний коэффициент аномальной фрактальной диффузии D_f . Для никеля вблизи кремниевой подложки она определяется значением $\theta = 1,7$. Для медной подложки – $\theta = 0,82$. В соответствии с выражением (1) рассчитанная фрактальная диффузия D_f уменьшалась на 2 порядка вблизи поверхности медной подложки и на 4 порядка вблизи кремниевой. Это означает, что на процесс лазерного осаждения наноструктур на разные подложки действительно существенное влияние оказывают зародыши фрактальных структур на их поверхности. Эти зародыши принимают все более правильные геометрические формы с увеличением коэффициента диффузии в объеме коллоидного раствора. Такое формирование поверхностных наноструктур для осажденного слоя в процессе лазерного воздействия существенно зависит от материала подложки и позволяет заданным образом управлять топологией формирования поверхностных наноструктур при лазерном осаждении вещества из коллоидного раствора. То есть, формируя на поверхности подложки предварительный рельеф, можно управлять морфологией осажденного слоя.

Заключение

Предложен способ формирования наноструктурированных покрытий на основе технологий LDPCS при воздействии импульсно-периодического лазерного излуче-

ния на коллоидные растворы. В процессе лазерного воздействия получены разные топологии осаждения наночастиц на различные подложки с образованием микро- и наноструктурированных конгломератов вдоль траектории сканирования лазерного пучка по поверхности подложки. Свойства осажденного слоя зависят от материала, используемого при приготовлении коллоидного раствора, и типа подложки. Производимое лазерное воздействие не приводит к разрушению поверхности подложки и обеспечивает достаточно хорошую адгезию в процессе осаждения. В зависимости от режима лазерного воздействия удастся варьировать толщину осажденного слоя в пределах от 100 нм до 1 мкм.

Полученные протяженные массивы наноструктур имеют фрактальную структуру, и для них определены соответствующие фрактальные параметры. Это позволило обнаружить существенное уменьшение коэффициентов аномальной диффузии вблизи наноструктур, которое для медной подложки составляет 2 порядка, а для кремниевой – 4 порядка по сравнению со значением в объеме коллоидного раствора. Эти последние результаты представляют значительный физический интерес и имеют самостоятельное значение в аспекте управления кинетикой образующихся поверхностных наноструктур.

Работа выполнена частично за счет средств аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы», ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» и при поддержке грантов РФФИ 06-08-96332-р_центр_а, 09-02-99012-р_офи, 09-02-01410-а.

Библиографический список

1. K. Kordas et al.: Laser-assisted metal deposition from liquid-phase precursors on polymers. *Applied Surface Science*. 2001. №172. С. 178–179.
2. Рыженков, Д.И. Наноматериалы /

Д. И. Рыженков [и др.]. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. – С. 365.

3. H. Moilanen, J. Remes, S. Leppävuori: Low resistivity LCVD direct write Cu conductor lines for IC customization // [Physica Scripta](#).- 1997.Т69. С. 237.

4. Антипов, А.А. Лазерное осаждение наночастиц из наносителей / А. А. Антипов [и др.] // Вооружение. Технология. Безопасность. Управление : сб. тр. IV межотраслевой конф. – Ковров: КГТА им. В.А. Дегтярева, 2009. – С. 7–13. – ISBN 978-5-86151-377-7.

5. Смирнов, Б. М. Физика фрактальных кластеров / Б. М. Смирнов. – М.: Наука, 1991. – ISBN 5-02-014629-3.

6. Высоцкий, В. В. Диффузионно-контролируемая агрегация частиц вблизи фрактальных поверхностей / В. В. Высоцкий, В. И. Ролдугин // Коллоидный журнал. – 1998. Т. 60. – № 6. – С. 729.

7. Затевалов А.М., Диффузионно-контролируемая агрегация частиц вблизи фрактальных поверхностей / А. М. Затевалов, В.И. Ролдугин, И.А. Тугорский // Коллоидный журнал. – 2000. Т.62. – № 4. С. 483-487 .

8. Соколов, Б. М. Размерности и другие геометрические показатели в теории протекания / Б. М. Соколов // Успехи физ. наук. 1986. Т. 150. № 2. С. 221.

9. Торохов Н. А., Определение фрактальной размерности поверхности эпитаксиального n-GaAs в локальном пределе / Н. А. Торохов [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2009. Т.43. Вып. 1. – С. 38-46.

10. Мандельброт, Б. Б. Фрактальная геометрия природы / Б. Б. Мандельброт. – М.: Институт компьютерных исследований, 2002. С. 656. – ISBN 5-93972-108-7.

11. Федер, Е. Фракталы / Е. Федер. – М.: Мир, 1991. – С 254. – ISBN 5-03-001712-7.

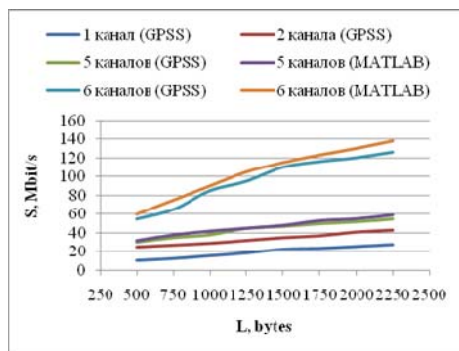
12. Потапов, А. А. Фракталы в радиоп физике и радиолокации: Топология выборки / А.А. Потапов. – М.: Университет. кн., 2005. – С.847.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ MESH-СЕТИ СТАНДАРТА IEEE 802.11S В СИСТЕМАХ GPSS И MATLAB С ИЗМЕНЯЕМЫМ КОЛИЧЕСТВОМ КАНАЛОВ УСТРОЙСТВА

Рассмотрены результаты моделирования mesh-сетей стандарта 802.11s в matlab и на языке GPSS для случаев с различным количеством разнесенных в коллизийном домене каналов

Mesh-сети – одно из основных направлений развития технологии Wi-Fi. Их широкому распространению во многом мешает недостаточно высокая пропускная способность, ограничиваемая интерференцией соединений mesh-устройств. Для повышения производительности спецификация IEEE 802.11s, определяющая mesh-технология, рекомендует использовать несколько частотных каналов и применять устройства с двумя или более радиointерфейсами. Задача организации многоканальных mesh-сетей состоит в оптимальном назначении каналов для интерфейсов mesh-устройств. Результаты моделирования получены с помощью разработанных аналитических моделей, реализованных средствами MATLAB, и при имитационном моделировании сети в системе GPSS.

Для исследования была выбрана схема полного разнесения коллизийного домена по каналам с использованием 5 и 6 каналов, а также схема с общим каналом и схема попеременного назначения двух фиксированных каналов (см. рисунок).



При условии, что размер пакета фиксирован, а размер буфера на каждом mesh-узле

достаточно велик, имеем пропускную способность $S=N\lambda^*$, где N – число оконечных устройств[1].

$$S = 8p_{sj}L/T_{slot}, \quad (1)$$

где L – размер пакета в байтах,

$$T_{slot} = p_e \sigma + (T_d + SIFS + t_{ACK} + DIFS), \quad (2)$$

$$\sum p_{sj} + p_c(T_d + EIFS)$$

– средняя длительность виртуального слота, T_d и t_{ACK} – времена передачи кадра данных и кадра подтверждения, а SIFS, DIFS и EIFS – межкадровые промежутки, определяемые протоколом IEEE 802.11 [2].

На основе предложенной математической модели на рисунке приведены зависимости пропускной способности сети S от длины пакета для сетей с 1, 2, 5 и 6 каналами. Из рисунка следует, что добавление всего одного канала увеличивает максимальную скорость генерации данных и пропускную способность сети более чем в двое, а использование схемы полного разнесения коллизийного домена с шестью каналами позволяет многократно увеличить пропускную способность сети. Кроме того, данные зависимости показывают важность максимального агрегирования данных, поступающих от терминалов: при максимальном агрегировании пропускная способность достигает 60 Мбит/с для сети с 5 каналами и 140 Мбит/с для сети с 6 каналами.

Библиографический список

1. Вишневский, В.М. Широкополосные беспроводные сети передачи информации / В.М. Вишневский [и др.]. М: Техносфера, 2005.

2. IEEE P802.11s/D3.0. *Draft STANDARD for Information Technology* – [Electronic resource] / IEEE Standards Activities Department.–[USA]: IEEE, 2009.

3. Hiertz, G.R.; Max, S.; Rui Zhao; Denteener, D.; Berlemann, L.; , "Principles of IEEE 802.11s," Computer Communications and Networks, 2007. ICCCN 2007. Proceedings of 16th International Conference on , vol., no., pp.1002-1007, 13-16 Aug. 2007 doi: 10.1109/ICCCN.2007.4317949.

4. Pandey, P.; Satish, S.; Kuri, J.; Dagale, H.; "Design & implementation of IEEE 802.11s mesh nodes with enhanced features," Mobile

Adhoc and Sensor Systems, 2009. MASS '09. IEEE 6th International Conference on , vol., no., pp.639-644, 12-15 Oct. 2009 doi: 10.1109/MOBHOC.2009.5336945.

5. Pinheiro, M.; Sampaio, S.; Vasques, F.; Souto, P.; , "A DHT-based approach for Path Selection and Message Forwarding in IEEE 802.11s industrial Wireless Mesh Networks," Emerging Technologies & Factory Automation, 2009. ETFA 2009. IEEE Conference on , vol., 10.1109/ETFA.2009.5347111no., pp.1-10, 22-25 Sept. 2009doi.

А.В. Лоханов, А.В. Осин, М.В. Руфицкий
Владимирский государственный университет

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ MESH-СЕТИ С ВОСХОДЯЩИМ ТРАФИКОМ

Рассмотрена математическая модель MESH – сети с восходящим трафиком, описаны вероятности успешной передачи пакетов и возникновения коллизий, пропускная способность и максимальная скорость генерации данных в кластере.

Благодаря низким ценам на оборудование, а также легкости в установке беспроводные сетевые технологии получили широкое распространение. На сегодняшний день технология Wi-Fi, в основе которой лежит стандарт IEEE 802.11 [1], является наиболее популярной и бурно развивающейся технологией беспроводных сетей передачи данных. Комитет IEEE 802 LAN/MAN по стандартизации локальных и городских сетей недавно инициировал разработку дополнения IEEE 802.11s [2] к стандарту [1], описывающего технологию mesh-сетей, которая считается сегодня одной из наиболее многообещающих и привлекает к себе внимание все большего круга исследователей (см., например, [3, 4]).

Mesh-сеть – это многошаговая сеть, устройства которой (mesh-станции, МР, Mesh Points) обладают функциями маршрутизатора и способны использовать различные пути для пересылки пакета. Mesh-технология становится особенно необходимой при отсутствии проводной инфраструктуры для соеди-

нения станций. В этом случае пакеты пересылаются от одной mesh-станции до другой до достижения шлюза с проводной сетью. Для большей надежности mesh-станция может иметь более одной соседней mesh-станции.

Идея mesh-сетей берет свое начало из мобильных ad hoc сетей (MANET), в которых функция маршрутизации была реализована на уровне IP. Протокол MANET обладал ограниченной производительностью, поскольку IP-уровню не доступна информация об условиях беспроводной передачи и соседних узлах. В частности, IP-уровню недоступна информация о вероятности искажения пакетов помехами и коллизиями, а также о схеме модуляции и кодирования, используемой в каждом из соединений. Напротив, в mesh-сетях IEEE 802.11s механизмы маршрутизации работают на MAC-уровне, где эта информация доступна, что делает маршрутизацию намного более эффективной. За счет протокола маршрутизации, работающего на MAC-уровне, mesh-технология позволяет в

несколько раз увеличить зону покрытия сети. Это важно, потому что с ростом скорости передачи зона покрытия сети падает, а mesh-технология компенсирует этот эффект.

В данной работе анализируются существующие результаты исследований, направленных на разработку оптимальной схемы назначения/распределения каналов в mesh-сети. Предлагаются и анализируются возможные алгоритмы назначения каналов в транспортных mesh-сетях, имеющих древовидную топологию и состоящих из устройств с двумя радиointерфейсами.

При разработке схемы назначения/распределения каналов в транспортной mesh-сети следует учитывать ее принципиальные особенности. Во-первых, в транспортной mesh-сети mesh-узлы не мобильны, хотя и могут быть перемещаемы. Поэтому топология сети меняется не часто, и эти изменения происходят в основном из-за случайных отказов узлов, отключения узлов на профилактику или добавления новых узлов. Во-вторых, трафик, исходящий от каждого mesh-узла, является агрегированным, т.е. суммой трафика, входящего в этот узел от других узлов или сетей; поэтому интегральные характеристики трафика меняются не слишком часто, что позволяет вести оптимизацию, основываясь на измеряемых профилях трафика. В-третьих, трафик в такой mesh-сети является в основном вертикальным, т.е. направлен либо от шлюзов в кабельную сеть к конечным узлам (например, при доступе к ресурсам Интернета или к корпоративным серверам) или от конечных узлов к шлюзам в кабельную сеть (например, при сборе данных, генерируемых конечными устройствами).

При вертикальном трафике каждый шлюз в кабельную сеть может рассматриваться как корень дерева покрытия. В общем случае каждый узел mesh-сети может участвовать в одном или нескольких деревьях, причем в последнем случае требуется наличие многих радиointерфейсов. Однако при вертикальном трафике каждый узел mesh-сети активно

связан только с одним деревом, используя другие при восстановлении после отказа. Эта особенность позволяет ограничиться двумя интерфейсами в каждом узле mesh-сети. Многие исследования показали, что деревья покрытия должны строиться на основе динамической метрики маршрутизации, учитывающей возможные изменения параметров трафика и качества связи и обеспечивающей баланс нагрузки на сеть.

Назначение каналов должно проводиться по следующим принципам: для установления прямого соединения со своим соседом узел должен использовать канал, общий с этим соседом; для снижения интерференции следует минимизировать число соседей, с которыми данный узел делит общий канал. Таким образом, необходимо разбить каждый коллизийный домен на столь большое число каналов, сколько возможно для поддержания требуемой связности сети.

Рассмотрим случай, когда имеется только восходящий трафик. В качестве показателей производительности, оценка которых будет проводиться, выберем:

1) максимальную скорость генерации данных λ^* каждым из конечных устройств, при которой вероятность потери пакета пренебрежимо мала;

2) пропускную способность сети S , равную среднему числу бит полезной информации, доставляемых в единицу времени к шлюзам в кабельную сеть, при условии максимальной скорости генерации данных λ^* каждым из конечных устройств.

Предполагается, что скорость генерации λ одинакова для всех конечных устройств; промежуточные mesh-станции не генерируют трафик, а только выполняют транспортную функцию. Размер пакета фиксирован, а размер буфера на каждом mesh-узле достаточно велик. Тогда $S=N\lambda^*$, где N – число конечных устройств.

Очевидно, скорость генерации данных терминалом j кластера i в условиях, когда пакеты не теряются, равна $m_{ij}\lambda$, где m_{ij} –

число конечных устройств, трафик которых проходит через данный терминал. Тогда максимальная скорость генерации данных λ_i^* , при которой пакеты не теряются в данном кластере, очевидно, соответствует пропускной способности данного кластера в условиях, когда терминал $j^* = \arg(\max(m_{ij}))$ с максимальной интенсивностью трафика или несколько таких устройств $j \in J_i$, если эта максимальная интенсивность одинакова для $j \in J_i$, работают в условиях насыщения. Очевидно, $S_i = \sum_j S_{ij}$, где S_{ij} – пропускная способность, обеспечиваемая для терминала, причем

$$S_i = \lambda_i^* S_{ij}^*, \quad (1)$$

Для нахождения пропускной способности S_{ij} разобьем время работы кластера на виртуальные слоты, в начале каждого из которых активные станции изменяют счетчики отсрочки (backoff). Когда этот счетчик становится равным 0, терминал начинает передачу. В следующих формулах номер кластера i опущен для краткости. Пусть τ_i – вероятность начала передачи терминалом j в данном слоте. Тогда слот либо является пустым с длительностью σ с вероятностью

$$p_e = \prod_i (1 - \tau_i), \quad (2)$$

либо в нем ведется успешная передача терминалом j с вероятностью

$$p_{sj} = \prod_{v \neq j} (1 - \tau_v), \quad (3)$$

либо происходит коллизия с вероятностью

$$p_c = 1 - p_e - \sum_j p_{sj}.$$

Соответственно

$$S_j = 8 p_{sj} L / T_{slot}, \quad (4)$$

где L – размер пакета в байтах,

$T_{slot} = p_e \sigma + (T_d + SIFS + t_{ACK} + DIFS) \sum p_{sj} + p_c (T_d + EIFS)$ – (5) средняя длительность виртуального слота, T_d и t_{ACK} – времена передачи кадра данных и кадра подтверждения, а SIFS, DIFS и EIFS –

межкадровые промежутки, определяемые протоколом IEEE 802.11 [1].

Для нахождения вероятности τ_j^* начала передачи терминалом j^* , работающим в насыщении, используем метод:

$$\tau_j = \frac{2(1 - 2p_i)}{(1 - 2p_i)(W + 1) + p_j W (1 - (2p_j)^r)}, \quad (6)$$

где W – минимальное конкурентное окно, r – двоичный логарифм отношения максимального и минимального размера конкурентного окна [1],

$$p_{j^*} = 1 - \prod_{j \neq j^*} (1 - \tau_j) - \quad (7)$$

вероятность того, что передача терминала j^* оказалась неудачна. Вероятности начала передачи другими терминалами находятся из (1), (3) и (4):

$$\tau_j = \frac{1}{1 + \frac{m_{j^*}}{m_j} \frac{1 - \tau_{j^*}}{\tau_{j^*}}}, \quad (8)$$

т.е. (7) преобразуется к виду

$$p_{j^*} = 1 - \frac{1}{\prod_{j \neq j^*} \left(\frac{m_j}{m_{j^*}} \frac{i_{j^*}}{1 - i_{j^*}} + 1 \right)}, \quad (9)$$

Таким образом, решая систему уравнений (6) и (9), находим вероятности начала передачи, подставляя которые в (2) и (3), определяем вероятности слотов. Подставляя вероятности слотов в (4) и (5), находим пропускную способность кластера, а затем с помощью (1) – максимальную скорость генерации данных $\lambda^* = \min\{\lambda_{j^*}\}$, при которой пакеты не теряются ни в одном из кластеров, а, следовательно, и пропускную способность сети S .

Библиографический список

1. IEEE Std 802.11-2007, Revision of IEEE Std 802.11-1999. IEEE Std 802.11-2007, IEEE Standard for Information Technology—Telecommunications and information exchange between systems—Local and metropolitan area network—Specific requirements—Part 11:

Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications. IEEE Computer Society, June 2007.

2. IEEE P802.11s/D2.0. Draft STANDARD for Information Technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications Amendment: Mesh Networking [Electronic resource] / IEEE Standards Activities Department.–[USA]: IEEE, 2008.

3. Bahr M. Update on the Hybrid Wireless Mesh Protocol of IEEE 802.11s. Proc. 4th IEEE Int. Conf. on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems, October 8-11, 2007 Pisa, Italy.

4. Duffy K., Leith D.J., Li T., Malone D. Modeling 802.11 mesh networks // IEEE Comm. Magazine.–New York: 2007.–vol. 10, no 6.– pp 635-637

5. Lyakhov A., Pustogarov I., Gudilov A. IEEE 802.11 Direct Links: Interference Classification and Modeling., Revised Selected Papers From Int. Workshop of Multiple Access Communications - MACOM 2008, pp. 15-24

6. IEEE P802.11s/D1.0. Draft STANDARD for Information Technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications Amendment: Mesh Networking [Electronic resource] / IEEE Standards Activities Department.–[USA]: IEEE, 2006.

7. Skalli, H. Ghosh, S. Das, S.K. Lenzini, L. Conti, M. Channel Assignment Strategies for Multiradio Wireless Mesh Networks: Issues and Solutions. IEEE Comm. Magazine, 2007, vol. 45, no. 11, pp. 86-95.

8. Raniwala A., Gopalan K., Chiueh T. Centralized channel assignment and routing algorithms for multi-channel wireless mesh net-

works. ACM Mobile Computing and Communications Review, 2004, vol. 8, pp. 50-65.

9. Raniwala, A. Tzi-cker Chiueh. Architecture and algorithms for an IEEE 802.11-based multi-channel wireless mesh network. Proc. of INFOCOM '05, vol. 3, pp. 2223- 2234.

10. Naveed A., Salil S. Kanhere, Sanjay K. Jha. Topology Control and Channel Assignment in Multi-radio Multi-channel Wireless Mesh Networks. Proc. of MASS '07, pp. 1-9.

11. Makram S.A., Gunes M. Channel Assignment for Multi-Radio Wireless Mesh Networks using Clustering. Proc. of ICT'08.

12. Fu W., Xie B., Agrawal D.P., Kumar A. A Tree-based Channel Assignment Scheme for Wireless Mesh Networks. Proc. of MASS 2007, pp. 1-6.

13. Raniwala A., Chiueh T. Evaluation of a wireless enterprise backbone network architecture. Proc. 12th Annual IEEE Symposium, 2004, pp. 98-104.

14. Bahl P., Chandra R., Dunagan J. SSCH: Slotted Seeded Channel Hopping for Capacity Improvement in IEEE 802.11 Ad-Hoc Wireless Networks. Proc of ACM Mobicom, 2004, pp. 216-230.

15. Kyasanut P., Vaidya N. Routing and Interface Assignment in Multi-Channel Multi-Interface Wireless Networks., Proc of IEEE Conf. Wireless Commun., 2005, vol. 4, pp. 2051- 2056.

16. Kyasanut P., Vaidya N. Routing and Link-layer Protocols for Multi-Channel Multi-Interface Ad Hoc Wireless Networks. Mobile Comp. and Commun. Rev., 2006, vol. 10, no. 1, pp. 31-43.

17. Вишнеvский, В. М. Широкополосные беспроводные сети передачи информации / В.М. Вишнеvский [и др.] М.: Техносфера, 2005. -591 с. ISBN 5-94836-049-0.

18. Bianchi G. Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function. IEEE J. on Selected Areas in Commun., 2000, vol. 18, no. 3, pp. 535-547.

РАСЧЕТ ПОРОГА ПЕРКОЛЯЦИИ ДЛЯ НАНОТРУБОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УНИВЕРСАЛЬНОГО ПАРАЛЛЕЛЬНОГО СЕТЕВОГО СИМУЛЯТОРА

Описаны результаты экспериментов по численному моделированию процесса перколяции (протекания) в регулярных решетках, узлы которых заполнены по некоторым правилам (с заданной концентрацией и геометрическими характеристиками заполнения). Такая конструкция может служить моделью наноструктурированного материала (нанотрубки в полимерной матрице). Моделирование осуществлялось с помощью разработанной универсальной системы моделирования сетевых структур (УСМСС) с расширяемой функциональностью. В ходе экспериментов получены численные значения порогов перколяции для набора длин трубок. Кроме того, эксперименты служат подтверждением заявленных свойств системы моделирования (универсальность, расширяемость, хорошее распараллеливание).

Особое значение для математического моделирования в области нанотехнологий и наноматериалов имеют методы высокопроизводительных вычислений. Существует целый ряд программных средств, реализующих данные информационные технологии для моделирования физико-химических процессов в наномасштабе. Большинство из них позволяют проводить детальное моделирование малых и средних по размерам групп молекул (так называемое маломасштабное моделирование). Данные программные продукты не предназначены для многомасштабного исследования, которое может охватывать миллионы структурных элементов. В связи с этим очень актуальным представляется поиск новых перспективных способов моделирования наноструктурированных материалов с применением технологий параллельных и распределенных вычислений.

В рамках НИР по созданию универсальной среды моделирования сетевых структур [3] нами была предложена концепция использования разрабатываемого программного обеспечения для моделирования наноматериалов. Согласно данной концепции многомасштабное моделирование осуществляется на основе сетевой модели, основные положения которой таковы: 1) структурные узлы размещаются в узлах регулярной (двумерной или трехмерной) решетки; 2) включенный узел соответствует структурному

узлу (атому, группе атомов) внедренного материала, выключенный — структурному узлу матрицы; 3) связи между узлами соответствуют физическим связям между структурными элементами; 4) в свойствах узлов модели возможно хранить физические параметры моделируемого объекта (например, флаг того, что данный узел входит в токопроводящий кластер).

Пример задачи, в которой такой подход оправдан, следующий [1, 2]. Сформируем случайную топологию с помощью включения узлов таким образом, что доля включенных узлов (иными словами, концентрация внедряемого материала – нанотрубок) была равна заданному параметру p , а длина групп последовательно включенных узлов – параметру d . Рассмотрим задачу перколяционного типа, в которой необходимо найти минимальную концентрацию токопроводящих нанотрубок некоторой длины, которые, будучи внедренными в полимерную матрицу, обеспечивают проводимость от левой стенки к правой. Иными словами, говоря на языке классической теории, требуется определить порог перколяции [1, 2] в задаче узлов для некоторой регулярной решетки.

Будем решать ее следующим образом: Выбираем отрезок $[p_{\min}^0, p_{\max}^0]$, на котором предполагается наличие фазового перехода (в качестве первого приближения может быть выбран отрезок $[0, 1]$).

Запускаем P экспериментов на одной и

той же топологии, но с разным p : $p = p_{\min} + (p_{\max} - p_{\min})/(P - 1)$. Обозначим за p_i параметр i -эксперимента.

Получаем выборку $I_i = I(p_i)$, I – индикатор события «имеет место протекание» (для чего предварительно запускаем лавинный процесс распространения «тока» от всех включенных узлов левой стенки). Это будет вектор вида $(0, 0, \dots, 0, x_1, x_2, \dots, x_n, 1, \dots, 1)$.

Пусть переход имеет место для $p = p^*$ (такое p_i , при котором появляется первая единица). Тогда в качестве нового отрезка $[p_{\min}^1, p_{\max}^1]$ необходимо взять отрезок, содержащий p^* и меньший по длине, чем исходный отрезок $[p_{\min}^0, p_{\max}^0]$, например в 2 или 4 раза.

Повторяем серию экспериментов на новом отрезке $[p_{\min}^1, p_{\max}^1]$. Дробление отрезка повторяем до тех пор, пока его длина не станет достаточно малой (например, длина подотрезков разбиения окажется меньше погрешности). Пусть $[p_{\min}^n, p_{\max}^n]$ – такой отрезок.

Далее на отрезке $[p_{\min}^n, p_{\max}^n]$ проводим некоторое число экспериментов уже без последующего дробления. Эти эксперименты предназначены для того, чтобы при одном и том же наборе p реализовывать разные случайные конфигурации (в отличие от предыдущих подготовительных экспериментов, целью которых был поиск отрезка $[p_{\min}^n, p_{\max}^n]$).

Все результаты таких серий мы объединяем в вектор p и вектор w , где w_i равно доле экспериментов, при которых параметр p был равен p_i , и наблюдалось протекание. Самое левое значение в векторе w равно 0, самое правое – 1, а внутри – промежуточная последовательность чисел из отрезка $[0, 1]$, причем даже не обязательно монотонно возрастающая от 0 до 1.

Нижним порогом перколяции p_1 назовем p_i такое, что $w_i > 0$ и $j < i \Rightarrow w_j = 0$.

Верхним порогом перколяции p_2 назовем p_i такое, что $w_i = 1$ и $j > i \Rightarrow w_j = 1$.

Входным параметром является концентрация материала p , выходным — факт на-

личия протекания w . С помощью «массового» эксперимента перебора концентрации p , который позволяет поставить система управления универсальным сетевым симулятором, возможно найти пороги перколяции с заданной точностью. Эксперименты проводились на топологии трехмерной решетки $100 \times 1000 \times 1000$, точность — 0.001, число повторов эксперимента $P = 10$. Поскольку система моделирования является распределенной и, в частности, разбивает моделируемую топологию на части (которые можно назвать «слоями»), то в конкретно данной задаче можно ожидать очень хорошей эффективности распараллеливания. Действительно, значение ускорения на 25 процессорах достигает величины порядка 20, на 50 процессорах — порядка 40.

График величины индикатора события «имеет место протекание тока» (отнесенной к числу повторов эксперимента при разных топологиях) в зависимости от концентрации нанотрубок разной длины представлен на рисунке. На графике видны три фазовых перехода — соответственно для трубок длины $d = 1$, $d = 10$ и $d = 20$. В первом случае переход происходит на отрезке $[0.097; 0.099]$, во втором – на $[0.019; 0.024]$, в третьем – на $[0.011; 0.012]$. Границы отрезков как раз и являются соответственно нижним и верхним порогом перколяции. Отметим, что с ростом длины трубки пороги перколяции уменьшаются, что соответствует реальным экспериментам.

Таким образом, численные эксперименты подтвердили правомерность применения сетевого симулятора для решения данного типа задач. В заключение отметим, что переход к физически более достоверным моделям может быть осуществлен в рамках этого же инструмента моделирования благодаря наличию расширяемых свойств (которые могут описывать более сложную модель) и введению подгоночных коэффициентов [1], связывающих модель и реальные объекты.



Доля экспериментов, в которых имела место перколяция, в зависимости от концентрации материала при трех разных значениях длины трубок d

Библиографический список

1. Grimmet G. Percolation. 2nd edition. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1999 – 456pp.
2. Тарасевич, Ю.Ю. Перколяция: теория, приложения и алгоритмы / Ю. Ю. Тарасевич. – М.: Едиториал УРСС, 2002. – 112 с.
3. Шамин, П. Ю. Параллельный сетевой симулятор: концепция и перспективы развития / П.Ю. Шамин, А.С. Алексанян, В.Г. Прокошев // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2009. – № 3. – С. 18 - 24.

О.Р. Никитин, А.В. Породников

Владимирский государственный университет

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В ЗАДАЧАХ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПРИРОДНЫХ СРЕД НА ОСНОВЕ ДАННЫХ МИКРОВОЛНОВОГО МОНИТОРИНГА

Рассматриваются вопросы использования многослойных нейронных сетей для определения диэлектрических параметров многослойных природных объектов на основе данных дистанционного радиотеплового мониторинга. Приведены основные качественные характеристики распределения радиояркостной температуры среды в зависимости от электрофизических параметров слоев

Введение

В настоящее время происходит изменение климатической ситуации на планете. Точных сведений о негативном влиянии антропогенной деятельности на климат планеты не существует. Часть климатических изменений являются этапами естественной эволюции планеты. Природные катастрофы независимо от их природы приводят к огромным потерям. Целью радиотеплового зондирования природных сред как науки получения сведений об электрофизических параметрах подстилающей поверхности на основе данных дистанционного мониторинга является выявление закономерностей в развитии тех или иных климатических событий, происходящих в исследуемом регионе. Выяснив законы развития и изменения

какого-либо фактора, можно предсказать его поведение с течением времени. Такие прогнозируемые факторы позволят свести к минимуму последствия природных катастроф. Разработка алгоритмов прогнозирования климатической ситуации на основе данных СВЧ-мониторинга в настоящее время – наиболее актуальная проблема, решение которой позволит снизить величину ущерба, наносимого стихийными бедствиями и опасными природными явлениями.

Наибольший интерес представляют исследования активных природных сред, под которыми в первую очередь подразумеваются поверхностные и подповерхностные возгорания, торфяные пожары и пожары с открытым пламенем.

Задача исследования – разработка мето-

да и составление алгоритма определения диэлектрических параметров природных сред при априорной неопределенности структуры среды и ее свойств с помощью математического моделирования.

Выполнение задачи разделено на два этапа:

выявление характерных свойств распределения радиояркой температуры для многослойных сред с различными диэлектрическими параметрами;

поиск оптимального алгоритма определения значения диэлектрической проницаемости слоев двухслойной и трехслойной поверхностей.

В общем случае радиояркая температура с учетом подсветки атмосферы определяется выражением [1]:

$$T_A = \varepsilon(\theta, \varepsilon) T_0 K(H, \theta) + |R(r, \theta)|^2 T_{\text{атмосф}}(\theta) K(H, \theta) + T_{\text{поверх}} [1 - K(H, \theta)]$$

Здесь первое слагаемое – излучение самой поверхности в направлении θ , ослабленное множителем $K(H, \theta)$ на трассе распространения волн от поверхности до антенны; второе слагаемое — полное излучение атмосферы, отраженное поверхностью в направлении θ и ослабленное на трассе распространения; третье слагаемое — прямое излучение атмосферы между приемной антенной и поверхностью в направлении θ , где T_0 – термодинамическая температура поверхности; $\varepsilon(\theta, \varepsilon)$ – коэффициент излучения поверхности.

В трехмерной системе координат эта зависимость представляет собой плоскость, по которой можно определить значение диэлектрических свойств зондируемой поверхности [2]. Теоретические модели излучающих природных поверхностей [3] могут быть упрощены и разделены на две группы:

1. Поверхности земного шара, которые характеризуются незначительными неровностями, поэтому их можно непосредственно заменить сглаженной поверхностью с теми же электрическими параметрами.

2. Поверхности со значительными неров-

ностями, которые должны быть заменены сглаженными поверхностями с эквивалентными электрическими параметрами.

Характер неровностей рельефа лесного массива либо торфяного болота можно определить как комбинированный, т.е. чередование участков, удовлетворяющих критерию Релея с неудовлетворяющими критерию Релея участками. Методика расчетов рассеянного поля представляет собой сочетание методов Кирхгофа и метода малых возмущений. Искомое поле рассматривается как сумма полей, рассеянных крупными и мелкими неровностями. При этом поле, возмущенное мелкими неровностями, определяется через поле, рассеянное крупными неровностями [3].

Электрофизические параметры подстилающей поверхности (комплексное волновое сопротивление в заданном диапазоне частот или относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла электрических потерь) варьируются в пределах ограниченной территории в широких пределах, зависящих как от первоначальной структуры почвы, так и от окружающих условий – температуры, влажности, наличия растительности, скорости и направления ветра и т.д. [2].

Из выражений, приведенных в [1], [2], следует, что распределение радиояркой температуры зависит от многих параметров. Наибольший вклад в формирование структуры распределения поля вносят диэлектрические проницаемости слоев и их толщина. Характер распределения радиояркой температуры трудно аппроксимировать. Невозможно составить математическую модель, с необходимым уровнем точности описывающую многослойную природную среду в изменяющихся внешних условиях. Поэтому стандартные методы математической статистики не позволяют учесть всех факторов, а также работать в условиях априорной неопределенности.

Математическое моделирование многослойных природных сред позволило выделить несколько характерных особенностей распределения радиояркой температуры.

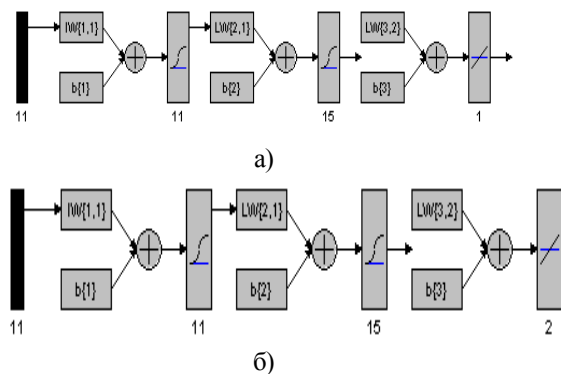
Как для неактивных сред (с коэффициентом отражения любого слоя $R_{i,k} < 1$), так и для активных (с коэффициентом отражения любого слоя $R_{i,k} > 1$) определяющими в характере распределения радиояростной температуры являются значения глубины каждого слоя, а также величины диэлектрической проницаемости для неактивной среды и реальной и мнимой частей диэлектрической проницаемости для активных сред ($\dot{\epsilon} = \epsilon' - j\epsilon''$). Можно выделить следующие основные особенности распределения радиояростной температуры: для волн вертикальной поляризации максимум излучения расположен в надире [4]; для волн горизонтальной поляризации максимум излучения энергии происходит при углах наблюдения $\theta \in [-85^\circ; -65^\circ]$ и $\theta \in [65^\circ; 85^\circ]$. Положения максимумов радиояростной температуры зависит от толщины и диэлектрической проницаемости среднего слоя, а также диэлектрической проницаемости подстилающей среды. Распределение радиояростных температур вертикальной и горизонтальной поляризаций при отсутствии среднего слоя совпадает с распределением радиояростных температур при толщине среднего слоя $0,5\lambda$ (λ - длина волны, принимаемая радиометром) при любых значениях диэлектрической проницаемости подповерхностной среды. При изменении глубины подповерхностного слоя наблюдается периодичность характера распределения радиояростной температуры. Это вызвано интерференцией СВЧ-волн в пределах конкретного слоя и однозначно определяется его толщиной и длиной волны. При различной толщине подповерхностного слоя радиояростная температура может оказываться одинаковой. Это также накладывает ограничения на задачи идентификации природных сред методами дистанционного зондирования. Таким образом, для задач дистанционного зондирования необходимо обеспечивать угол наблюдения $\theta \in [-85^\circ; -65^\circ]$ и $\theta \in [65^\circ; 85^\circ]$.

Из приведенных рассуждений следует, что существуют характерные особенности поведения радиояростной температуры в зависимости от толщины слоя, его электрофизических параметров, условий окружающей среды и т.д., которые необходимо учитывать при дистанционном зондировании Земли (ДЗЗ).

Получаемые методом ДЗЗ данные имеют сложную структуру из-за наличия большого количества условно неучтенных факторов, вариаций окружающих условий, многомерности полученных векторов параметров, сложности самой функции распределения радиояростной температуры и т.д. Неформализованные, априорно неопределенные данные делают целесообразным применение для задач идентификации активных и неактивных природных структур искусственных нейронных сетей.

В исследовании были разработаны две нейронные сети.

1. Сеть для решения задач, связанных с двухслойной поверхностью (рисунок, а).
2. Сеть для решения задач, связанных с трехслойной поверхностью (рисунок, б).



Структура нейронных сетей

Входными данными для сетей служит вектор-распределение, представленный значениями радиояростной температуры, измеряемой в 11 угловых точках. Результатом работы нейронной сети, представленной на рис. 1, а, является значение диэлектрической проницаемости подстилающего слоя в случае двухслойной поверхности.

Сеть, представленная на рис. 1, б, вычисляет значения диэлектрической проницае-

мости подповерхностного слоя трехслойной поверхности и его глубину.

В результате математического моделирования с помощью первой сети были получены результаты с точностью 1-5 % относительно эталонного значения (подаваемого на вход в процессе обучения) при колебаниях значений входного вектора-распределения радиояркостной температуры в пределах 5-10 % (погрешность определения радиояркостной температуры, влияния окружающей среды и неучтенных факторов). Точность, достигнутая при вычислении диэлектрической проницаемости и глубины подповерхностного слоя, составила 10 - 20% при колебаниях значений входного вектора-распределения радиояркостной температуры в пределах 5 - 10%. В условиях практического применения сетей достигнутая точность достаточна, так как резкое скачкообразное изменение радиояркостной температуры в природных условиях на 3 - 5% указывает на аномалию исследуемой поверхности, так как разность средних температур участков земной поверхности не может превышать 5–10°С на сравнительно большой по площади территории.

Количество элементов входного вектора распределений может быть различным. Увеличение квантования углового интервала приведет к увеличению количества нейронов во входном слое сети, и как следствие к уменьшению относительной погрешности и увеличению времени обучения. В данном случае такое преобразование нецелесообразно, так как точность получаемых с помощью нейросети данных достаточна для задач идентификации.

Разработанные нейронные сети были применены для вычисления диэлектрической проницаемости среды по данным микроволнового радиотеплового мониторинга. В лаборатории НОЦ «Радиофизические методы зондирования природных сред» ВлГУ была проведена серия экспериментов по измерению радиотеплового излучения природной среды, представленной 15-сантиметровым слоем сухого грунта, распо-

лагающегося в кювете 0,9x0,9м с подогревающим элементом. Данные радиотеплового зондирования были обработаны с помощью разработанных нейронных сетей. В результате работы было получено значение диэлектрической проницаемости $\epsilon = 4,2$, что соответствует сухой почве [2].

Заключение

Характер распределения радиояркостной температуры многослойной поверхности определяется диэлектрическими и геометрическими показателями. Использование нейронных сетей в задачах обработки информации целесообразно при сложном характере обрабатываемых данных: многомерных массивов, отсутствие четкой формализации, табличное представление, сложность аппроксимации и т.д. Достигаемая при этом точность составляет 5 - 20%, что достаточно для выявления аномальных температурных объектов.

Библиографический список

1. Веласко, В. Пассивное дистанционное зондирование подповерхностных сред / В. Веласко // Успехи современной радиоэлектроники. – 2006. – №5. – С. 28.
2. Сытник, О.В. Методы идентификации природных сред и объектов по данным радиофизического эксперимента / О.В. Сытник // Успехи современной радиоэлектроники. – 2006. – №1. – С. 15.
3. Волосюк, В.К. Математические методы моделирования физических процессов в задачах дистанционного зондирования Земли / В.К. Волосюк, В.Ф. Кравченко // Успехи современной радиоэлектроники. – 2000. – №2. – С.30.
4. Веласко, В. Исследование качественных показателей пассивного радиозондирования случайной неоднородной подповерхностной среды с плоской границей раздела / В. Веласко [и др.] // Успехи современной радиоэлектроники. – 2006. – №7. – С. 43.

О. Р. Никитин, А. Н. Кисляков, А. А. Шулятьев
Владимирский государственный университет

МЕТОД МИКРОВОЛНОВОГО МНОГОСПЕКТРАЛЬНОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В ЗАДАЧЕ МОНИТОРИНГА ЛЕСНЫХ МАССИВОВ

Представлен обзор метода многоспектрального дистанционного зондирования, проведено сравнение его с существующими методами и продемонстрирована возможность его применения в задачах мониторинга земных покровов и, в частности, лесных массивов.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, многоспектральный метод, лесные массивы, комплексирование.

Введение

В связи с интенсивным развитием техники и возрастающими потребностями в оперативном мониторинге экологической обстановки для наблюдения за различными объектами и явлениями на поверхности Земли всё более широкое применение находят дистанционные методы исследования. Ключевой особенностью этих методов является возможность получать информацию о параметрах изучаемого объекта на расстоянии путем измерения не самих параметров, а некоторых связанных с этими параметрами величин, например интенсивности электромагнитной энергии, излучаемой исследуемым объектом в различных диапазонах длин волн [1].

Многие природные объекты излучают электромагнитную энергию в достаточно широком диапазоне частот, поэтому иногда различить природные объекты между собой с достаточной долей вероятности в одном диапазоне частот невозможно. Наиболее перспективным путём преодоления означенного недостатка является построение систем многоспектрального мониторинга, предоставляющих возможность надёжного различения объектов за счёт проведения исследований в очень широком спектре длин волн. Такие системы мониторинга земной поверхности необходимы для дистанционного контроля инфраструктуры городского хозяйства: выявления энергопотерь, оценки состояния городского хозяйства, контроля состояния магистральных газо- и нефтепроводов. Анализ данных дистанционного зон-

дирования позволяет зафиксировать районы пожаров и оценить масштабы бедствия, выявить антропогенные тепловые загрязнения природных объектов.

К настоящему моменту многоспектральный метод дистанционного зондирования разработан ещё очень слабо: отдельные результаты позволяют свидетельствовать о работоспособности и перспективности данного метода, однако область исследований, относящаяся к ключевой его особенности – комплексированию результатов многоспектральных измерений, – находится ещё в зачаточном состоянии. Это говорит о необходимости проведения дальнейших исследований в данной области.

1. Принцип работы системы мониторинга

При проведении зондирования в радиодиапазоне на фиксированной частоте результатом измерений является распределение радиояркостной температуры совокупности объектов (сцены) земной поверхности, а значит, и интенсивности излучаемой энергии. Однако спектральное распределение в радиодиапазоне дает еще больше информации об объектах сцены и её условиях. Информативность также возрастет при использовании различных диапазонов длин волн, например подключении оптического или инфракрасного диапазонов [2].

Для повышения информативности признаков необходимо использовать комплексную систему мониторинга земной поверхно-

сти, включающую в себя радиометрическую и оптическую системы. В общем виде схема представлена на рис. 1.

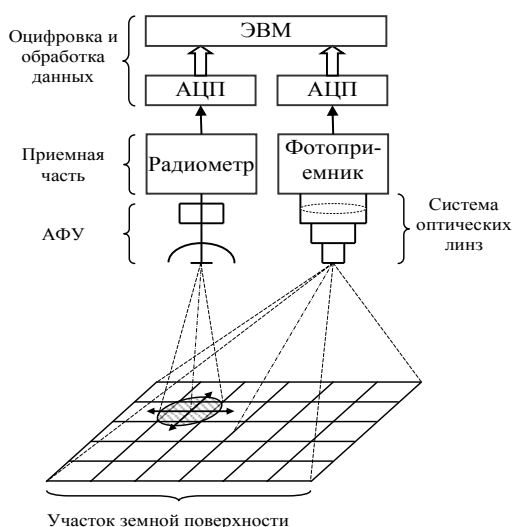


Рис. 1. Структурная схема системы получения изображений многоспектрального дистанционного зондирования Земли

Радиометрическая система в отличие от оптической системы является сканирующей. Для получения изображений одной и той же по площади поверхности необходимо прибегнуть к масштабированию, установке дискретного шага сканирования радиометра, потому как радиометрическая и оптическая системы зондирования имеют разные разрешения по площади, в то время как они должны быть соизмеримы [3]. В остальном методики радиотепловых и инфракрасных аэрокосмических съемок и фототелевизионных съемок, а также методы дешифрования данных исследований схожи.

1.1. Получение изображений

Работа системы включает две основные стадии: получение изображений и анализ изображений. Ввод изображений в память ЭВМ осуществляется с помощью СВЧ-радиометра с электронным сканированием, который измеряет интенсивность излучения объектов и переводит распределение интенсивности по пространственным координатам в оцифрованные изображения, а также оптического детектора (фотоприемника), который переводит оптическое распределение

яркости изображения в электрические сигналы и далее через АЦП – в цифровые коды.

Ввод изображений в ЭВМ неизбежно связан с дискретизацией изображений по пространственным координатам X и Y и квантованием значения яркости в каждой дискретной точке. Кроме того, осуществляется целый перечень процедур предварительной обработки данных (рис. 2).



Рис. 2. Блок-схема технологии предварительной обработки данных

Итогом работы системы получения изображений является запись в память ЭВМ файла с пиксельным изображением, предназначенным для дальнейшего анализа [4].

1.2. Анализ данных

Автоматизированное выявление аномальных объектов на цифровых изображениях является задачей анализа с помощью ЭВМ, состоящей из нескольких этапов: первичное получение снимков, фильтрация, оконтуривание, сегментация, распознавание, классификация. Присутствие аномальных объектов на изображении проявляется в резких перепадах яркости и цвета.

Основная цель комплексирования методов дистанционного зондирования – обеспечение надежности однозначного решения задачи распознавания и определения основных параметров исследуемых объектов.

Рассмотрим пример однозначного решения задачи распознавания разных типов покрытия при картировании. Пусть свойства пород шести основных типов (A, B, C, D, E, F), слагающих район исследований, пред-

ставлены в виде распределений свойств (рис. 3). Если значение радиояростной температуры опознаваемого комплекса T' , то этот комплекс можно отнести к одному из трех типов пород A, C, E . Если определена еще его интенсивность в оптическом диапазоне I' , то комплекс можно отнести к одному из двух классов A и C . Наличие третьей характеристики, например градация изображения по тонам H , позволяет однозначно определить его принадлежность к классу C .

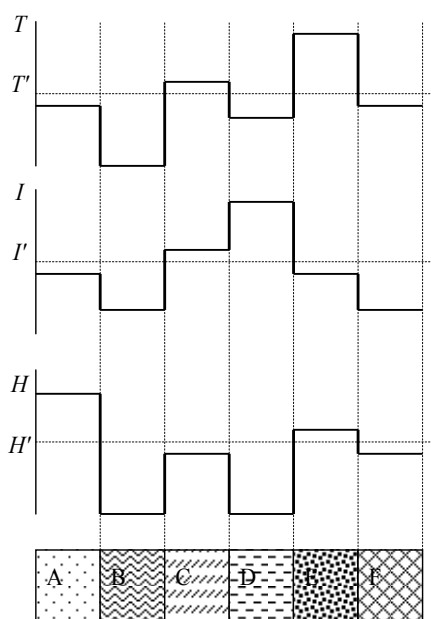


Рис. 3. Распределение свойств поверхности по комплексу методов

Анализ рис. 3 показывает, что любой из шести типов покрытия по данным трех методов (радиометрии, монохромной и хроматической фотосъемки) опознается однозначно. Аналогичная ситуация возникает и при определении количественных параметров объектов. Если по данным одного метода неопределенность количественных оценок весьма велика, то совместная количественная интерпретация двух геофизических полей или более, основанных на разных физических принципах, позволяет существенно сузить пределы неоднозначности [4].

Совместная обработка комплекса геофизических данных, направленная на решение широкого круга задач с необходимой де-

тальностью и надежностью, требует очень больших объемов расчетов и в полной мере может быть реализована лишь при использовании ЭВМ, банков данных и автоматизированных систем обработки информации.

Рациональное комплексирование предусматривает выбор методики работ (точности наблюдений), последовательности применения методов, способов интерпретации и дальнейшего использования получаемых данных.

2. Условия эффективного применения методов комплексирования

Условиями, определяющими успех применения конкретного метода для решения задачи распознавания, являются контрастность физических свойств объектов и вмещающей среды, относительные геометрические размеры вызывающих аномалии объектов и уровень помех различного происхождения.

Кроме контрастности средних значений свойств, важное значение имеет дисперсия. Увеличение расстояния между математическими ожиданиями уменьшает вероятность ошибки, а увеличение дисперсии увеличивает вероятность ошибки [5].

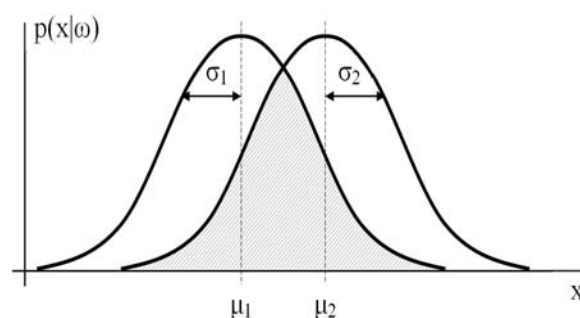


Рис. 4. Разделение признаков

Удобной количественной мерой различия свойств можно назвать надежность разделения $\gamma = 1 - q$, где q – отношение площади перекрытия вариационных кривых к сумме полных площадей под вариационными кривыми (рис. 4). Надежными для различия свойств считают значения γ от 75 до 100 % [2].

3. Результаты экспериментальных исследований

Для осуществления цели работы был поставлен эксперимент по получению радиотеплового изображения сцены лесного массива в одной плоскости, его сопоставлению с оптическим изображением, оценке возможности использования методов распознавания образов при обработке радиоизображения лесного массива. Фотография исследуемой сцены представлена на рис. 5.



Рис. 5. Сцена (лесной массив)

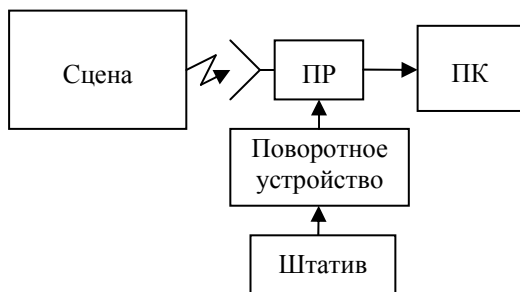


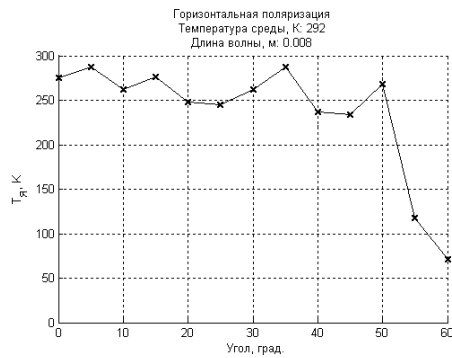
Рис. 6. Структурная схема экспериментальной установки

Экспериментальная установка (рис. 6) состояла из штатива с закреплённым на нём приёмником излучения (ПР) в поворотном устройстве и портативной ЭВМ (ПК). В качестве приёмников излучения использовались два радиометра (на диапазоны длин волн 8 мм с шириной главного лепестка диаграммы направленности 16° и 3 мм с шириной главного лепестка ДН 7°) и оптический датчик, представляющий собой фоторезистор (диапазон чувствительности 420 – 720 нм по уровню половинной мощности), уста-

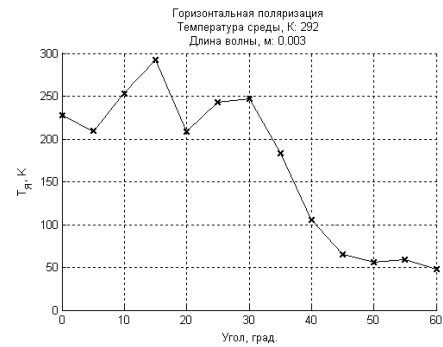
новленный на конце открытой с другой стороны узкой непрозрачной трубки, зачернённой изнутри (ширина ДН $1,2^\circ$). Измерения проводились следующим образом: радиометр настраивался на определённую поляризацию, после чего поворачивался в пределах некоторого угла и снималась зависимость радиояркостной температуры от угла наблюдения. Затем аналогичным образом снимались показания со второго радиометра и оптического датчика. Измерения проводились в течение короткого интервала времени в дневное время суток, что позволило не учитывать изменение освещённости и интенсивности подсветки атмосферы. По окончании эксперимента проводилось сопоставление полученных экспериментальных данных.

Результаты измерений представлены на рис. 7. Измерения на длинах волн 8 мм (а) и 3 мм (б) велись через каждые 5° , в видимом диапазоне – через каждый 1° . С радиометров снимались значения радиояркостной температуры, с фотоприёмника – значения напряжения, которые затем возводились в квадрат и нормировались. Измерения велись в различных погодных условиях (хорошая видимость и туман). По результатам нами были сделаны следующие выводы. Во-первых, с уменьшением длины волны возрастает разрешающая способность измерения. Во-вторых, при измерении в оптическом диапазоне имеется существенная зависимость результатов измерения от погодных условий, в то время как в миллиметровом диапазоне она выражена гораздо слабее (так, в ходе поставленного нами эксперимента изменение интенсивности радиотеплового излучения лежало ниже шумового порога).

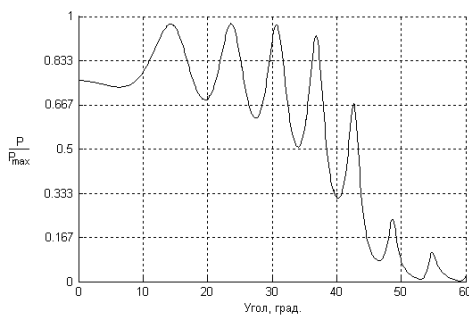
В итоге следует заключить, что измерения в различных диапазонах длин волн взаимно дополняющие, а значит, использование комплексирования результатов этих измерений для повышения итоговой достоверности считается целесообразным.



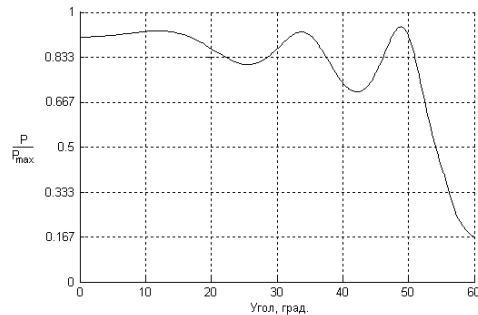
а - результаты измерения установкой в диапазоне 8 мм



б - результаты измерения установкой в диапазоне 3 мм



в - результаты измерения установкой в видимом диапазоне (хорошая видимость)



г - результаты измерения установкой в видимом диапазоне (туман)

Рис. 7. Результаты измерений интенсивности излучения в различных диапазонах

Библиографический список

1. Кашкин, В. Б. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений: учеб. пособие / В.Б. Кашкин, А.И. Сухинин. – М.: Логос, 2001. – 264 с. – ISBN 5-94010-138-0.
2. Гарбук С. В. Космические системы дистанционного зондирования Земли / С.В. Гарбук, В.Е. Гершензон. – М.: Изд-во А и Б, 1997. – 296 с. – ISBN 5-89227-002-7.
3. Горелкин, А.Л. Селекция и распознавание образов на основе локационной информации / А.Л. Горелик [и др.]; под ред. А.Л. Горелика. – М.: Радио и связь, 1990. – 240 с. – ISBN 5-256-00721-1.

4. Дейвис, Ш.М. Дистанционное зондирование: количественный подход / Ш.М. Дейвис [и др.]; под ред. Ф. Свейна и Ш. Дейвис: пер. с англ. – М.: Недра, 1983. – 415 с. – 1978. – 296 с.
5. Никитин, О. Р. Решение экологических задач наземно-дистанционными радиофизическими методами: монография / О. Р. Никитин, В. М. Гаврилов; издат. – полиграф. центр МИ ВлГУ. – Муром, 2009. – 105 с.: – ISBN 978-5-8439-0185-1.
6. Андреев, Г. А. Тепловое излучение миллиметровых волн земными покровами / Г. А. Андреев // Зарубежная радиоэлектроника. – 1982. – № 12. – С. 3 – 39.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ МАЛОПОТРЕБЛЯЮЩИХ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Рассматривается сравнительный анализ автоматизированного проектирования пьезоэлектрического преобразователя энергии для малопотребляющих электронных средств в разработанном программном обеспечении и в среде Ansys. Приведены результаты примера использования разработанного программного обеспечения.

Одной из тенденций развития приборостроения является снижение потребляемой мощности мобильными приборами. Снижение потребления настолько существенное, что позволяет использовать в качестве элементов питания альтернативные источники питания, например пьезоэлектрические генераторы, работающие в качестве преобразователей механических воздействий в электрическую энергию [1]. Габаритные размеры, геометрия конструкции и используемые материалы пьезоэлектрического преобразователя должны быть рассчитаны исходя из объекта их установки и требований по получаемой электрической мощности. Большое разнообразие объектов установки пьезоэлектрических генераторов и требования сокращения времени проектирования требуют использования при их разработке программных продуктов автоматизации проектирования.

В системе Matlab разработана подсистема автоматизированного проектирования пьезоэлектрических преобразователей энергии для малопотребляющих радиоэлектронных средств. Программное обеспечение состоит из трех модулей: модуль проектирования ударных пьезоэлектрических преобразователей, модули преобразователей воздействия гармонической и случайной вибрации.

Для верификации достоверности результатов разработанной подсистемы необходимо провести сравнение результатов программы с результатами реальных опытов либо с результатами известных программных продуктов, высокая достоверность ре-

зультатов которых подтверждена многочисленными исследованиями.

Проведение реальных опытов связано со значительными материальными затратами для производства пьезоэлектрических элементов, поэтому принято решение промоделировать конструкции преобразователя при различных внешних воздействиях, рассматриваемых в данной работе. Для сравнительного анализа выбран программный комплекс конечно-элементных расчетов Ansys, так как существует возможность проводить анализ воздействия ударов на конструкцию, гармонический и спектральный анализ, также в Ansys существует возможность проведения «пьезоэлектрического анализа».

Точность ММ, используемой в разработанном программном обеспечении, оценивается степенью совпадения значений электрических зарядов, рассчитанных в Ansys

Q_A , и значений зарядов тех же пьезоэлектрических элементов, рассчитанных с помощью оцениваемой программы [3]. Относительная погрешность ΔQ составляет в процентах

$$\Delta Q = \frac{Q_M - Q_A}{Q_A} 100.$$

По данной формуле рассчитывается относительная погрешность одного элемента, для оценки точности всей программы используется средняя относительная погрешность $\Delta \bar{Q}$, которая рассчитывается по формуле

$$\Delta\bar{\varphi} = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta\varphi_i}{N},$$

где N – количество элементов.

Необходимо определить пределы погрешности. В разработанной программе и в Ansys для расчетов применяются разные характеристики одних и тех же материалов. В различных источниках разница значений используемых характеристик составляет до 39,4 %. При значении средней относительной погрешности меньше 39,4 % считать ММ, используемую в разработанном программном обеспечении, адекватной. При сравнении необходимо оценить экономичность разработанной программы - затраты вычислительных ресурсов, время расчета параметров конструкции в разработанной программе и в Ansys.

Ни одно из проведенных моделирований не дало значение относительной погрешности выше 39,4 %, средняя относительная погрешность составила 14,87 %. Для более наглядного сравнения результатов разработанной программы и Ansys построена гистограмма на основании данных значений электрических зарядов, занесенных в таблицу. Данные в гистограмме представлены в относительных единицах, где за уровень единицы принято среднее значение между результатами разработанной программы и Ansys, (рис. 1).

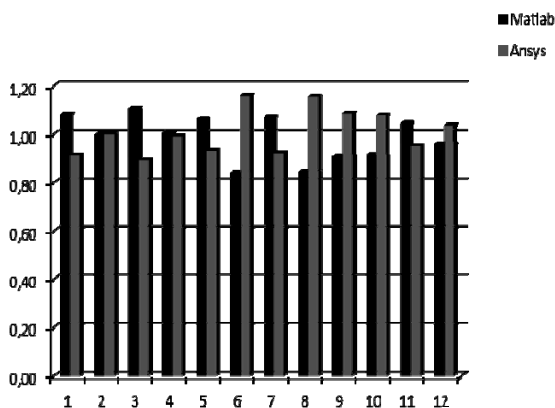


Рис. 1. Сравнение результатов разработанного программного обеспечения в Matlab и в Ansys

Из рис. 1 видно, что разброс значений находится в пределах, которые позволяют

делать вывод об адекватности модели. Для сравнения двух систем учитывается скорость проектирования. Скорость выполнения в обеих системах сопоставима, но необходимо учесть, что в Ansys расчеты ведутся на основании результатов разработанной программы. Расчет конструкции пьезоэлектрического преобразователя энергии является итерационным. В сравнительном анализе в Ansys проводится расчет единственной конструкции, то есть при создании программы на языке APDL для Ansys время моделирования увеличится в несколько раз, что свидетельствует о преимуществе разработанного программного обеспечения.

Одной из основных особенностей разработанного программного обеспечения можно назвать расчет топологии электродов пьезоэлектрического преобразователя при вибрационных воздействиях [2]. Для сравнительного анализа рассматривается конкретный пример.

Входные данные разработанной программы:

- 1) материалы: ЦТС -19, PZT-4;
- 2) спектральная плотность: $0, 0002 \text{ (м/с}^2\text{)}^2/\text{Гц}$;
- 3) ограничения сторон:
 $0,0005 \leq \text{ширина} \leq 0,5016 \text{ м}$,
 $0,0005 \leq \text{длина} \leq 0,5 \text{ м}$,
 $0,0005 \leq \text{толщина} \leq 0,01 \text{ м}$;
- 4) диапазон частот: от 49 до 91 Гц;
- 5) заданное значение электрического заряда: $1,0 \cdot 10^{-5} \text{ Кл}$.

Выходные данные разработанной программы:

- 1) невозможно получение заданного значения электрического заряда при данных ограничениях габаритных размеров;
- 2) номер вошедшей в диапазон собственной частоты: 2;
- 3) значение собственной частоты: 52,07 Гц;
- 4) материал: ЦТС -19;
- 5) габаритные размеры:
длина: 0,572 м,
ширина: 0,0838 м,
высота: 0,0033 м;
- 6) значение максимально возможного

электрического заряда при заданных ограничениях: $10,09 \cdot 10^{-5}$ Кл;

7) координаты разрыва электродов:

ось X: 0.4 м,

ось Y: –.

Номер собственной частоты совпал, значение собственной частоты, рассчитанной в Ansys, составляет 58,32 Гц. В Ansys координаты перегиба оцениваются графически по форме пластины (рис. 2).



Рис. 2. Форма пластины, моделирование №12

Из рис. 2 видно, что есть один перегиб; если перегиб находится на 70 % длины пластины, то отсутствие разрыва электрода в данном месте приведет к тому, что будет получено 40 % от возможной энергии. В данном примере применение разработанной ММ топологии электродов дает эффект 40 % по сравнению с предыдущими разработками.

Таким образом, разработанное программ-

ное обеспечение является предпочтительным при проектировании пьезоэлектрического преобразователя энергии для малопотребляющих электронных средств, так как скорость проектирования значительно превышает скорость проектирования в Ansys, выдаваемые результаты сравнимы.

Библиографический список

1. Шарапов, В.М. Пьезоэлектрические датчики / В.М. Шарапов, М.П. Мусиенко, Е.В. Шарапова, под ред. В.М. Шарапова. – М.: Техносфера, 2006. – 632 с. – ISBN 5-94836-100-4.

2. Пат. 82960 Российская Федерация. МПК Н 02 N2/18. Пьезоэлектрический генератор / Осин А.В., Руфицкий М.В. ; правообладатель: Открытое Акционерное общество «Завод «Автоприбор», № 2008143776/22; заявл. 05.11.08; опубл. 10.05.09. Бюл. № 13.

3. Вероятностно-статистические методы при проектировании электронных средств : метод. указания к лаб. работам / Е. Н. Талицкий; Владим. гос. ун-т. – Владимир, 2003. – 48 с.

А.В. Осин

Владимирский государственный университет

СИНЕРГИЯ НАНОЭФФЕКТОВ НА ПРИМЕРЕ АВТОНОМНОГО ИНДИКАТОРА ВИБРАЦИЙ

Рассматривается принцип работы наногенератора и нанолюминофора. Описан автономный наноиндикатор вибраций.

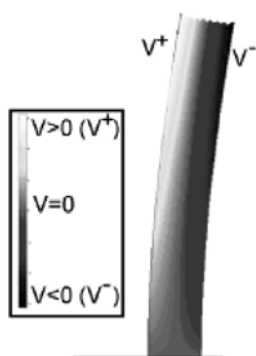
В настоящее время нанотехнологии проникают практически во все области человеческой деятельности, открывая при этом новые возможности.

Например, в медицине и биологии, разработаны нанометки на базе люминофора, которые люминесцентным свечением сигнализируют о местоположении объекта, к которому они прикреплены [4]. Такие сенсоры

могут внедряться в организм или другую закрытую систему. Расположение меток можно наблюдать при помощи флуоресцентного микроскопа.

Большинству сенсоров для автономной работы необходима электрическая энергия. Данная проблема решается при использовании разработанного в США наногенератора,

работающего на базе пьезоэффекта. Наногенератор представляет собой вертикальные висеры из оксида цинка. При механическом воздействии, например ультразвуковой волны, массив висеров начинает колебаться. Сочетание пьезоэлектрического эффекта и полупроводниковых свойств преобразует механическую энергию колебаний и деформаций в электрическую энергию [3]. По мере уменьшения размеров пьезоэлектрического материала его способность вырабатывать энергию возрастает. Так, наночастицы диаметром 21 нм производят на 100 % больше тока, чем в составе монолитного куска [5]. На рисунке представлен изогнутый висер с образованным напряжением [6].



Изогнутый висер, V – электрическое напряжение

В предложенном наногенераторе электрод расположен над массивом висеров. При нанесении на электрод электролюминофора возможно получить сенсор, сигнализирующий свечением об уровне вибрации, механических воздействиях в среде, в которой находится наногенератор. Такой сенсор представляет несомненный практический интерес. Требуется исследование и работоспособность сенсора при введении нанолуминофора в области между висерами. Подобная технология используется в структурах микропористый ксерогель – мезопористый анодный оксид алюминия, где используется

золь-гель метод [2]. Нанолуминофор действует так же, как обычный люминофор, то есть вещество, обладающее способностью излучать свет после воздействия на него, например, ультрафиолетом, электрическим разрядом или электронным пучком. Светящиеся частицы должны обладать заданными свойствами и быть строго определенной величины [1].

Таким образом, при совместном использовании нескольких наноструктурированных материалов возможно расширение области применения каждого из них. Возрастает эффективность прибора в результате взаимодействия в единой системе эффектов различных наноматериалов.

Библиографический список

1. Гаташ В. Метка на клетке // Поиск. – 2007. – № 3.
2. Сокол, В. А. Люминесценция тербия и европия в структурах ксерогель – пористый анодный оксид алюминия / В. А. Сокол // Доклады БГУИР. – Минск. – 2004. – № 2.
3. Автономные нанобатарейки [Электронный ресурс]: URL: http://www.nanometer.ru/2007/07/10/whisker_3761.html (дата обращения: 12.10.09).
4. Светящиеся метки для стволовой клетки [Электронный ресурс]: Информнаука URL: <http://ras.imbp.ru/index.php?id=70> (дата обращения: 12.10.09).
5. Пьезоэлектрики: новые возможности применения [Электронный ресурс]: URL: <http://www.nanonewsnet.ru/news> (дата обращения: 12.10.10).
6. Jinhui Song, Jun Zhou, and Zhong Lin Wang Piezoelectric and Semiconducting Coupled Power Generating Process of a Single ZnO Belt/Wire. A Technology for Harvesting Electricity from the Environment // Nano letters 2006 Vol. 6, No. 8 p.1656-1662.

А.А Антипов, С.В. Кутровская, А.О. Кучерик, Д.С. Ногтев, А.В.Осипов
Владимирский государственный университет

УПРАВЛЯЕМЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ СИНТЕЗ УГЛЕРОДНЫХ НАНОВОЛОКОН И НАНОКЛАСТЕРОВ ВО ВНЕШНИХ ПОЛЯХ

Лазерное формирование углеродных наноструктур – перспективный метод, позволяющий получать новые виды материалов. Возможность использования внешних полей при осаждении продуктов лазерной абляции дает возможность дополнительного управления свойствами синтезируемых наноструктур. В данной работе представлены результаты экспериментов по осаждению частиц плазменно-эрозионного факела под дополнительным воздействием постоянного электрического и неоднородного магнитного полей при воздействии постоянного лазерного излучения на углеродные мишени в присутствии атмосферного воздуха. Показано, что действие поля приводит к образованию углеродных волокон и кластеров, структура которых зависит от условий эксперимента.

Введение

Получение углеродных нановолокон и нанотрубок путем осаждения материала на подложку при лазерном воздействии на углеродные материалы является достаточно широко используемым методом, основы которого рассмотрены, например, в работах [1 - 5]. В зависимости от реализуемых условий (вакуум или буферный газ, наличие катализатора и т.д.) и используемых лазерных источников возможно получение различных типов углеродных наноматериалов – однослойных/многослойных и бездефектных/дефектных нанотрубок с диаметрами от 10 до 100 нм.

В то же время в ряде работ исследуется лазерное воздействие на углеродные материалы в атмосферном воздухе и/или в кислороде и обсуждаются возможности направленного изменения морфологических свойств получаемых наноструктур [6 - 11]. Такое управление свойствами осаждаемых материалов при получении наноструктур особенно перспективно при использовании дополнительных квазистатических внешних

полей. Например, в работе [12] показано, что во внешнем электрическом поле происходит радикальное изменение самой макрокартины образующихся наноструктур в процессе их синтеза: вместо типичных углеродных наноструктур образуется тончайшая сетчатая углеродная структура – паутина, состоящая из одностенных нанотрубок.

В данной работе приведены результаты по получению углеродных нановолокон и нанокластеров при лазерном воздействии на графитовые образцы, помещенные в постоянное электрическое и/или магнитное поле. Схема эксперимента была выбрана аналогичной работам [8 - 11], в которых показана принципиальная возможность формирования наноструктурированных аморфных и алмазоподобных углеродных пленок при лазерном воздействии в воздушной среде.

1. Лазерный синтез наноструктур в присутствии постоянного электрического поля

Для формирования углеродных нановолокон при лазерном воздействии на графит-

товые образцы в атмосферном воздухе нами использовалась следующая геометрия эксперимента (рис. 1).

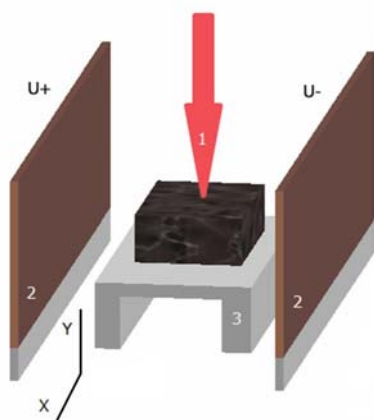


Рис. 1. Экспериментальная схема по лазерному синтезу углеродных наноструктур при воздействии на образец графита, помещенного в постоянное однородное электрическое поле: 1 – направление действия лазерного излучения; 2 – металлические пластины под постоянным электрическим напряжением; 3 – координатный столик с образцом графита на нем. Углеродные наноструктуры образуются на металлической пластине с отрицательным потенциалом путем осаждения на ней частиц графита при лазерной абляции

Образец из спектрально чистого графита помещался между пластинами из покрытого медной фольгой текстолита, на которые подавалось постоянное напряжение до 1000 В; расстояние между пластинами 1 см. При мощности лазерного излучения 30 Вт и диаметре лазерного пучка 30 мкм, который воздействовал на образец графита, наблюдалось образование интенсивного плазменного жгута, один конец которого располагался на образце, а другой – на пластине с отрицательным потенциалом на высоте 2 – 3 мм от поверхности образца. Этот плазменный жгут и определял процесс лазерного синтеза углеродных наноструктур. Само осаждение углеродного вещества на поверхность металлической пластины с отрицательным потенциалом через механизмы лазерной абляции визуально фиксировалось как образование темного пятна размером порядка 1 см по оси X и 1,5 см по оси Y. Исследование этого осажденного слоя с использованием растрового электронного микроскопа (РЭМ) по-

зволило обнаружить формирование углеродных волокон по всей площади осаждения (рис. 2).

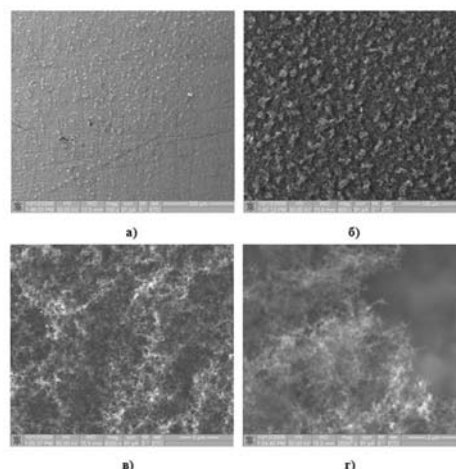


Рис. 2. РЭМ-изображение области осаждения частиц углерода на металлической пластине с отрицательным потенциалом при различном увеличении (напряжение между пластинами – 1000 В): а - x150; б – x600; в- x8000; г – x26267

Уменьшение напряжения на пластинах меняло кинетику процесса осаждения, что приводило к изменению структуры формирующихся нановолокон (рис. 3); при уменьшении напряжения до 300 В образование волокон не фиксировалось.

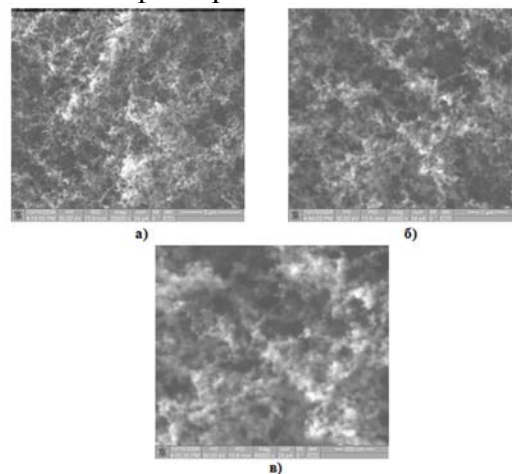


Рис. 3. Формирование углеродных нановолокон на металлической пластине с отрицательным потенциалом при лазерном воздействии на образец из спектрально чистого графита при напряжении между металлическими пластинами 800 В: а – изображение области с углеродными нановолокнами (x20000); последовательные увеличения данного изображения – x40000 (б) и x80000 (в)

Изменение материала мишени также приводило к изменению структуры осажденного слоя. На рис. 4 представлены РЭМ-изображения нанослоев, сформировавшихся при воздействии лазерным излучением мощностью 30 Вт на мишень из стеклоуглерода при сохранении той же величины электрического поля на металлических пластинах.

На металлической поверхности текстолитовой подложки в этом случае формируются не только отдельные волокна (рис. 4, а), но и микро-, нанокластеры (рис. 4, б), собирающиеся в сложные трехмерные фрактальные образования.

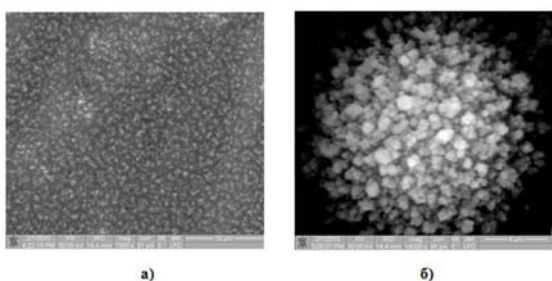


Рис. 4. РЭМ-изображения области осаждения частиц стеклоуглерода: а – углеродные нановолокна; б – углеродные нанокластеры

Таким образом, проведенный эксперимент наглядно продемонстрировал возможность формирования углеродных нановолокон на поверхности металлической пластины, служащей отрицательным электродом для приложенного внешнего электрического поля при лазерном воздействии на графитовый образец, помещенный в это электрическое поле в атмосферном воздухе. Получаемые в результате такой лазерной абляции углеродные наноструктуры близки по типу к нановолокнам, синтезированным в работе [12]. Однако в нашем случае на пересечениях углеродных нановолокон не обнаруживаются изолированные углеродные наночастицы. Отметим, что при перемещении лазерного пучка в сторону к пластине с положительным потенциалом на ней также наблюдались синтезируемые наноструктуры, что определялось достаточными объемом и интенсивностью облака лазерной абляции,

захватывающей и пластину с положительным потенциалом, для данной геометрии.

В целом обсуждаемый метод получения наноструктур представляется перспективным, поскольку позволяет использовать в качестве дополнительного управляющего параметра величину напряженности внешнего электрического поля; ее изменение масштабирует процесс образования наноструктур и управляет им, в том числе в аспекте формирования углеродных нановолокон разных типов.

2. Воздействие лазерного излучения на углеродные образцы в присутствии неоднородного магнитного поля

Другая возможность управления свойствами осажденного слоя при лазерном облучении углеродных образцов реализуется при расположении их в неоднородном магнитном поле. В этом случае осаждение углеродного нанослоя происходит в едином элементе на стеклянной подложке, пространственно отделенной от графитовой мишени с помощью прокладки (керамической шайбы) – рис. 5.

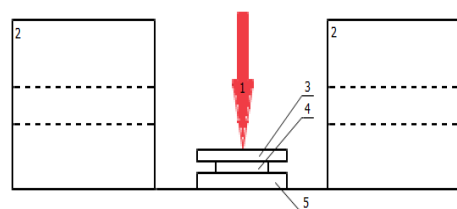


Рис. 5. Схема лазерного эксперимента в присутствии неоднородного магнитного поля: 1 – направление действия лазерного излучения; 2 – цилиндрические магниты; 3 – холодная подложка (стекло), на которой синтезируется нанослой углерода; 4 – прокладка; 5 – графитовая мишень. Наноструктуры на поверхности подложки образуются благодаря лазерной абляции с поверхности графитовой мишени

В эксперименте использовался образец спектрально чистого графита, который располагался между цилиндрическими магнитами (такая их форма была выбрана для увеличения степени неоднородности магнитного поля), установленными разнополярно на

расстоянии 45 мм друг от друга (напряженность магнитного поля составляла величину порядка 100 эрстед). На поверхности графитовой мишени была расположена керамическая шайба-прокладка высотой 2 мм и диаметром 11 мм с целью создания зазора для распространения лазерно-индуцированной плазмы вдоль поверхности подложки, возникающей при воздействии лазерного пучка на мишень. Лазерное излучение подводилось в геометрический центр мишени. Мощность лазерного излучения составляла от 15 до 45 Вт, диаметр лазерного пучка – 30 мкм, время воздействия доходило до 25 с. Влияние магнитного поля на формирование нанокластеров связано с разделением частиц в неоднородном поле, что позволяет изменять режим осаждения и реализовывать возможность формирования необходимых «зародышей» для дальнейшего роста нанокластеров.

После лазерного облучения мишени исследовалась подложка, на которой осаждался наноструктурированный слой углерода с помощью оптического микроскопа высокого разрешения и зондовой нанолaborатории Интегра-Аура (атомного силового микроскопа – АСМ). Полученные изображения показаны для этих двух методов диагностики соответственно на рис. 6, 7.

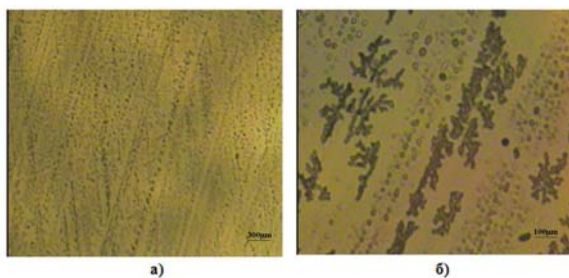


Рис. 6. Оптические изображения образовавшихся на поверхности подложки упорядоченных структур в виде полос равного наклона из частиц графита различного диаметра (а) и углеродных кластеров (б)

Наблюдаемое формирование кластеров наночастиц позволяет предположить, что процесс образования углеродного слоя при лазерном осаждении подобен росту дендри-

тов [13]: в зависимости от параметров эксперимента – расстояния до центра лазерного пучка, концентрации частиц в потоке в зазоре между мишенью и подложкой и на поверхности подложки, их энергии и т.д. – происходит образование «зародышей» наноструктур, которое в дальнейшем приводит к росту кластеров за счет теплового флуктуационного движения наночастиц. Рис. 7 соответствует образующейся на подложке наноструктуре на расстоянии 6 мм от центра лазерного облучения графитовой мишени.

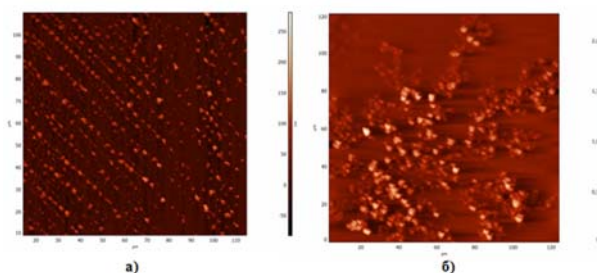


Рис. 7. АСМ-изображение структуры осажденного на подложку нанослоя углерода:
а – упорядоченное осаждение;
б – кластерная структура

При меньших расстояниях от центра лазерного пучка формировались преимущественно упорядоченные группы наноструктур, которые были распределены в виде параллельных полос по поверхности подложки на расстоянии 1 - 5мм от центра лазерного пучка. При уменьшении времени воздействия формирование нанокластеров не наблюдалось.

3. Исследование структурных свойств осаждения с применением методов фрактальной геометрии

Для анализа структурных свойств объектов, подобным представленным на рис.4, 6, 7, можно использовать методы фрактальной геометрии, которые позволяют выявить степень упорядоченности в наблюдаемой геометрии [14]. Одним из наиболее распространенных параметров для оценки степени отклонения структуры от евклидовой является фрактальная размерность [14].

Для расчета фрактальной размерности наблюдаемых структур использовался метод

структурных функций. Изображение в нашем случае представляется в виде массива значений $X_{i,j}$. Индексы задают положение пикселей на плоскости изображения (x, y), сама величина $X_{i,j}$ определяет высоту рельефа в данной точке. Тогда структурная функция изображения определяется следующим образом [15]:

$$S_I = \frac{1}{(K-I)^2} \sum_{i=1}^{K-I} \sum_{j=1}^{K-I} \left(|X_{i+I,j} - X_{i,j}| \right) + |X_{i,j+I} - X_{i,j}|, \quad (1)$$

где I – целое число, характеризующее смещение точки, в которой определяется величина X .

Если построить в двойном логарифмическом масштабе график зависимости $S_I(I)$, то для идеального двумерного фрактала он будет представлять прямую линию. Фрактальная размерность вычисляется как тангенс угла наклона рассчитанной кривой. Реальные изображения могут проявлять фрактальные свойства лишь в ограниченной области изменения значений параметра I . Ширина этой области (области скейлинга) является характеристикой степени фрактальности изображения. Если область скейлинга невелика (например, лишь в несколько раз превосходит элементарный шаг изменения величины I), следует при анализе изображения указывать на слабость проявления фрактальных признаков.

При обработке двумерных изображений для полученных кластеров было определено, что данные структуры являются фрактальными с размерностями в диапазоне значений от 1,64 до 1,87. То есть, в их структуре присутствует значительное количество лакун, однако с увеличением размерности проявляется упорядоченность в структуре и может наблюдаться периодичность в распределении высот.

4. Исследование осажденного слоя, методами КР-спектроскопии

Полученные наноструктурированные образцы исследовались также методом КР-спектроскопии. Изображение спектра приведено на рис. 8. Виден ряд полос: одна – с двумя линиями $\sim 1350 \text{ см}^{-1}$ и $\sim 1585 \text{ см}^{-1}$, а другая полоса – в области $2500\text{-}3200 \text{ см}^{-1}$. Наличие линии вблизи 1585 см^{-1} свидетельствует о синтезе кристаллической фазы углерода (G -линия). Данная линия характерна для графита, графена, углеродных нанотрубок и соответствует колебательной энергии $C-C$ связи [16, 17]. Полоса $1000 - 1500 \text{ см}^{-1}$ свидетельствует о наличии аморфной фазы (D -линия) [18 - 20]. КР в данной области спектра характерно для большинства углеродосодержащих соединений. Наличие D -линии в КР-спектре свидетельствует о наличии аморфной фазы углерода либо дефектов кристаллической структуры [19, 21 - 23]. Полоса $2500 - 3200 \text{ см}^{-1}$ является овертоном двух линий D, G и не несет специфической информации о полученной наноструктуре [16 - 23]. Полученные КР-спектры синтезированных наноструктур на поверхности образцов показывают, что в отличие от результатов работы [12] в нашем случае происходит образование как упорядоченных углеродных наноструктур (наличие G линии в спектре), так и формирование аморфной фазы углерода (наличие D линии в спектре). Интенсивность линий не несет прямой информации о количественном соотношении фаз углерода, поскольку определяется также сечением рассеяния (вероятностью), характерным для процессов рассеяния соответствующих G и D -линиям. Однако близкие значения интенсивностей G и D линий позволяют сделать вывод о сравнимости концентраций аморфного и кристаллического вещества по порядку величины. Этот результат соответствует выводам работы [24].

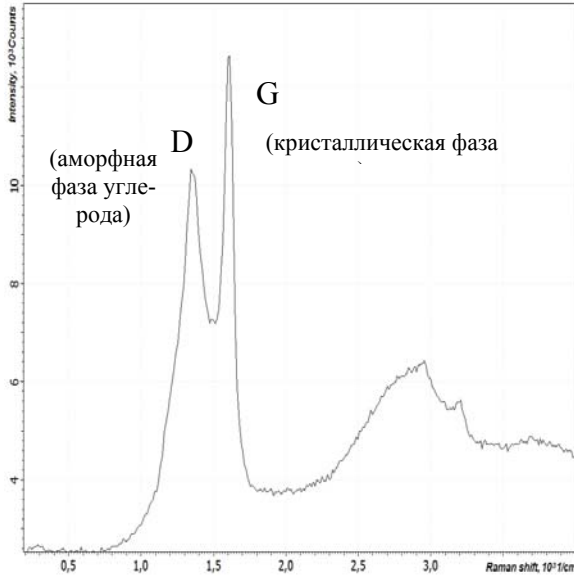


Рис. 8. КР-спектр осажденного на подложку углеродного нанослоя

5. Моделирование процесса образования нановолокон

Процесс формирования углеродных нановолокон и кластеров при распространении частиц плазмы в нашем эксперименте можно условно разбить на несколько этапов. На первом этапе за счет процессов лазерной абляции происходит формирование плазменного факела, который распространяется в направлении, перпендикулярном поверхности образца, по направлению действия лазерного луча, что способствует его дальнейшей ионизации. На втором этапе происходит отклонение ионизированных атомов от основного потока за счет действия силы Лоренца, которая в нашем случае из-за отсутствия магнитной компоненты будет иметь вид:

$$F_l = qE,$$

где q - заряд иона, E - напряженность электрического поля.

Для подобных экспериментов типична одноэлектронная ионизация и, следовательно, можно говорить о заряде $q = 1.6 \cdot 10^{-19} \hat{e}$, напряженность поля в условиях нашего эксперимента составляет $E = 2 \cdot 10^5 \hat{A}/\hat{m}$. Таким образом, сила, действующая на ионизированный атом со стороны постоянного электрического поля, может

достигать $F_l = 3.2 \cdot 10^{-14} \hat{H}$.

На третьем этапе поток ионизированных атомов, имеющий преимущественное направление за счет действия силы Лоренца, устремляется к поверхности подложки, за время распространения в данном потоке происходит восстановление электронной оболочки атомов и начинаются столкновения между атомами, что подтверждается большой площадью осажденного слоя с ярко выраженным центром диаметром 2 мм и ореолом вокруг него на расстоянии до 1см. Как известно, при распространении атомы углерода могут собираться в кластеры до 20 атомов, после чего возможна спонтанная самосборка. Описать формирование структур в таком потоке можно с использованием потенциала ближнего взаимодействия Терсоффа, позволяющего описывать образование ковалентных связей с учетом влияния соседних атомов:

$$\Phi_n(r_n) = \sum_{m \neq n}^N f_c(r_{nm})(f_r(r_{nm}) - a_{nm}f_a(r_{nm})),$$

где функции, описывающие притягивание и отталкивание, представлены в виде

$$f_r(r_{nm}) = \varepsilon^{(1)} \exp(-\alpha r_{nm}),$$

$$f_a(r_{nm}) = \varepsilon^{(2)} \exp(-\beta r_{nm}),$$

$$f_c = \begin{cases} 1, r_{nm} < r^{(1)} \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos\left(\frac{\pi(r_{nm} + r^{(1)})}{(r^{(2)} + r^{(1)})}\right), r^{(1)} < r_{nm} < r^{(2)} \\ 0, r_{nm} > r^{(2)} \end{cases}, \quad (2)$$

функция многопараметрического взаимодействия соседних атомов a_{nm} описывается как

$$a_{nm} = \left(1 + b_n^{\gamma_n} \left(\sum_{k \neq n, m} f_c(r_{nk}) \omega_{nk} g(\varphi_{nmk}) \right)^{\gamma_n} \right)^{-\frac{1}{2\gamma_n}},$$

$$g(\varphi_{nmk}) = 1 + \left(\frac{c_n}{d_n} \right)^2 - \frac{c_n^2}{d_n^2 + (e - \cos((\varphi_{nmk})))^2},$$

φ_{nmk} - угол между связями, соединяющими атомы n, m и n, k , $\alpha, \beta, \varepsilon^{(1)}, \varepsilon^{(2)}, r^{(1)}, r^{(2)}, b, \gamma$,

c, d, e – константы модели Терсоффа.

Определив силу, действующую между соседними атомами как $F(r) = -\frac{d\Phi(r)}{dr}$ и варьируя угол между атомами углерода в образующихся нановолокнах в диапазоне 0° - 60° и допуская, что среднее расстояние между атомами отвечает расстоянию в структуре графитового листа 0,142 нм, получаем силу взаимодействия между атомами в диапазоне 10^{-14} - 10^{-15} Н. То есть, в условиях нашего эксперимента возможно локальное образование протяженных кластеров углерода, которые при дальнейшем распространении могут формировать нановолокна или кластерные образования за счет изначального действия силы Лоренца, позволяющей расположить их в поле таким образом, что начинается образование химических связей (образование связей типа С-С подтверждают результаты спектроскопии комбинационного рассеяния). Такое предположение подтверждается и тем, что в центральной зоне осаждения волокна имеют более упорядоченную структуру по сравнению с осаждением на краях, где, по всей видимости, начинаются спонтанные столкновения, что приводит к образованию кластеров. Уменьшение напряженности поля приводит к тому, что возрастает броуновская компонента движения атомов и, как следствие, за счет множественных столкновений образуются микрокластеры сложной формы. Изменение материала мишени приводит к изменению характера абляции и распространения атомов в плазменном жгуте, что впоследствии изменяет структуру осажденного слоя. Аналогичные рассуждения верны и для процесса распространения частиц в магнитном поле, однако, за счет того, что поле существенно неоднородно, наблюдается формирование кластерных структур.

Заключение

В данной работе представлены первые результаты по получению управляемым образом углеродных наноструктур при воздействии лазерного излучения на углеродные

мишени в атмосферном воздухе в присутствии внешних электрического и/или магнитного полей. При этом зафиксировано изменение морфологии структуры осажденного на подложке слоя, которой можно управлять, варьируя параметрами эксперимента. Принципиальным результатом является формирование углеродных нановолокон и нанокластеров при лазерном осаждении углеродных наночастиц на подложку из лазерно-индуцированного факела, возникающего непосредственно над облучаемой мишенью, без применения дополнительных катализаторов.

Влияние внешне статического электрического поля при таком формировании углеродных нановолокон может быть связано с тем, что оно ориентирует поток распространяющихся в плазме частиц вдоль силовых линий, что дает возможность образованию волокон по физически выделенному направлению. В присутствии магнитного поля механизм формирования углеродных нановолокон аналогичен предыдущему случаю, но за счет неоднородности магнитного поля происходит дополнительное изменение структуры осажденного слоя.

Библиографический список

1. Гусев, А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А.И. Гусев – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 416 с.
2. Дьячков, П.Н. Углеродные нанотрубки: строение, свойства, применения / П.Н. Дьячков - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. – 293 с.
3. Елецкий, А. В. Углеродные нанотрубки / А. В. Елецкий // УФН. Т. 167 (9), 1997. – С. 945.
4. P.M. Ajayan, "Carbon Nanotubes", Handbook of nanostructured materials and nanotechnology, H.S. Nslwa, ed., Academic press, San Diego, 2000, vol 5, Chapter 6, p.375.
5. S.Elizer, N.Eliaz, E. Grossman, D. Fisher, I. Gouzman, Z. Henis, S. Pecker, Y. Horovits, M. Fraenkel, S. Maman, V.Ezersky and D. Elizer. Nanoparticles and nanotubes induced by femtosecond laser. Laser and Particle Beams (2005), 23.

6. Вуль, А.Я. Разработка технологии получения многофункциональных материалов на основе наноуглерода / А.Я. Вуль, А.С. Удовиченко // Российские нанотехнологии. № 7 - 8, 2007. Т. 2. С. 63 - 64.
7. Макарова Т. Л. Фототрансформация пленок C_{60} в присутствии и в отсутствии кислорода / Т. Л. Макарова [и др.] // Физика твердого тела. 1999. Т. 41; вып. 3. – С. 554 - 560.
8. Кононенко, Т.В. Импульсное лазерное напыление твердого углеродного покрытия при атмосферном давлении / Т.В. Кононенко [и др.] // Квантовая электроника. № 3. 2003. С. 189 - 191.
9. Абрамов, Д.В. Плавление углерода, нагреваемого сконцентрированным лазерным излучением в воздухе при атмосферном давлении и температуре, не превышающей 4000 К / Д.В. Абрамов [и др.] // Письма в ЖТФ, 2006, Т. 84. – № 5. – С. 315-319.
10. Абрамов, Д.В. Образование наноструктур на поверхности стеклоуглерода при лазерном воздействии / Д.В. Абрамов [и др.] // Квантовая электроника. – 2007. №11. – С. 37.
11. V. G. Naumov, V. E. Cherkovetch, V. U. Dubrovckii, F. K. Kosyrev, V. G. Vostrikov, V. I. Konov, A. P. Bolshakov, V. G. Ral'chenko Laser plasmatron for CVD synthesis of diamond in open air// Proc. SPIE, Vol. 6344, 63441N (2006); doi:10.1117/12.694418.
12. Козлов, Г.И. Образование углеродной паутины при синтезе одностенных нанотрубок в струе продуктов лазерной абляции, расширяющейся в электрическом поле / Козлов Г.И. // Письма в ЖТФ, 2003. Т 29; вып. 18. С. 88-94.
13. Мартыненко, Ю.В. Образование развитого нанорельефа осаждаемых пленок / Ю.В. Мартыненко, М.Ю. Нагель // Российские нанотехнологии – 2009, Т.4. – № 9-10. – С. 59 – 63.
14. Федер, Е. Фракталы / Е. Федер: пер. с англ. - М.: Мир, 1991. – С. 264.
15. Кроновер, Р.М. Фракталы и хаос в динамических системах основы теории / Р.М. Кроновер. – М.: Постмаркет, 2000. – 352 с.
16. A.C. Ferrari, J.C. Meyer, V. Scardaci, C. Casiraghi, M. Lazzeri, F. Mauri, S. Piscanec, D. Jiang, K.S. Novoselov, S. Roth, A.K. Geim, Raman spectrum of grapheme layers, Phys Rev 97, 187401 (2006).
17. A.C. Ferrari, J. Robertson, Raman spectroscopy in carbons: From nanotubes to diamond, Philos. Trans. Roy. Soc. A 362, 2267-2565 (2004).
18. C. Castiglioni, F. Negri, M. Rigolio, G. Zerbi, Raman activation in disordered graphites of the $A'1$ symmetry forbidden $k \neq 0$ phonon: The origin of D line, J. Chem. Phys. 115, 3769 (2001).
19. C. Castiglioni, M. Tommasini, G. Zerbi: Raman spectroscopy of polyconjugated molecules and materials: Confinement effect in one and two dimensions, Philos. Trans. R. Soc. Lond. A 362, 2425 (2004).
20. F. Tuinstra, J. Koenig, Raman spectrum of graphite, J. Chem. Phys. 53, 1126 (1970)
- A.C. Ferrari, J. Robertson, Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon, Phys. Rev. B 61, 14095 (2000).
21. R. P. Vidano, D. B. Fishbach, L. J. Willis, T. M. Loehr, Observation of Raman band shifting with excitation wavelength for carbons and graphites, Solid State Commun. 39, 341 (1981).
22. J.-C. Charlier, P. C. Eklund, J. Zhu, A. C. Ferrari, Electron and phonon properties of graphene: their relationship with carbon nanotubes, Springer (2008).
23. Аракелян, С.М. Формирование углеродных субмикронных и наноструктур на поверхности холодной подложки при воздействии лазерного излучения на поверхность углеродосодержащих материалов в атмосферном воздухе / С.М. Аракелян [и др.] // Квантовая электроника. № 38 (1). – 2008. – С. 73 - 76.
24. Лозовик, Ю.Е. Образование и рост углеродных наноструктур - фуллеренов, наночастиц, нанотрубок и конусов / Ю.Е. Лозовик, А.М. Попов // УФН. № 167 (7), № 151 (1997).

О.Р.Никитин, В.Г.Рау, Н.Н.Корнеева
Владимирский государственный университет

К.В.Скворцов
Владимирский государственный гуманитарный университет

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ НЕПЕРИОДИЧЕСКИХ СВЕРХРЕШЕТОК ДЛЯ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

Цель работы по теме проекта – создание методики проектирования серийных технологий сборки элементной базы радиотехнических наносистем для микроэлектроники: гетероструктур, сверхрешеток, наноструктур квантовых точек, наноматриц. Основной задачей является решение проблемы сопряжения материалов при сборке систем.

Решается задача по расширению базы производства наноэлементов радиосистем, среди которых наиболее перспективными в электронике, на наш взгляд, являются предфрактальные неперидические сверхрешетки, математической моделью которых служат фракталы, построенные на основе операции свертки. В статье представлен результат компьютерной сборки предфрактальных сверхрешеток на квантовых точках (рис.1) с симметрией осей 4-го и 5-го порядков.

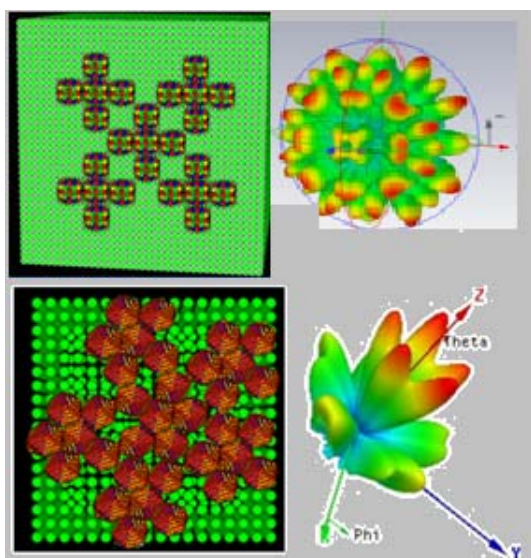


Рис. 1. Предфракталы и их рассеивающие свойства

В практике нанотехнологии для получения высококачественных нанослоев используется метод лучевой эпитаксии (МЛЕ). Оптоэлектроника, СВЧ-техника, светотехника, электронная техника для систем телекоммуникаций и связи работают на полупроводни-

ковых гетероструктурах и наноструктурах. В настоящее время МЛЕ используется для получения не только плоских слоев, но и массивов квантовых точек. В литературе отмечается, что наногетероструктуры обеспечивают наивысшую скорость пролета электронов в элементах различных приборов, минимальные потери энергии, возможность управления шириной запрещенной зоны.

Проблемы разработки современных базовых технологий серийного производства изделий микроэлектроники в основном упираются в решение задачи миниатюризации как отдельных модулей, так и радиотехнических систем в целом. При этом переход на наноуровень возможен только при решении, практических задач прямого исследования различных наноструктур, используемых при создании элементной базы микроэлектроники и задач прогнозирования структур и свойств наноматериалов, сопрягающихся при сборке радиотехнических наносхем.

В данной статье на базе компьютерного моделирования разбиений и упаковок в кристаллах и применения модели послойно-секториального роста структур [1] представлен результат расчета квантовых точек для сборки симметричных неперидических сверхрешеток и их использование в качестве элементов при проектировании приемно-передающих устройств.

Расчет производится по программам комплекса «компьютерный наноскоп». Интерфейс программы вместе с полученной квантовой точкой представлен на рис. 2. Исход-

ными данными на данном этапе является информация о положении атомов (молекул) в пространстве кристаллической решетки (рис. 3). Первая строка содержит информацию о количестве точек и связей, выбранных между ними, о параметрах кристаллической ячейки. Следующие 4 строки задают координаты точек и, наконец, остальные перечисляют систему выбранных связей между точками.

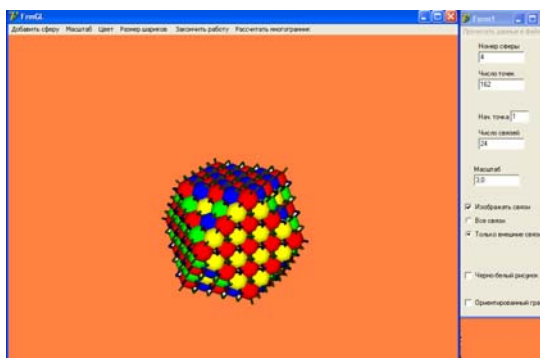


Рис. 2. Результат расчета квантовой точки в компьютерном наноскопе

File	Edit	Format	View	Help
4	24	5.64	5.64	90.0 90.0 90.0
0	0	0		
0	5	0.5	0	
0	5	0	0.5	
0	0	5	0.5	
1	2	0	0 0	2 3 0 0 0
1	2	-1	0 0	2 3 0 1 0
1	2	0	-1 0	2 3 0 0 -1
1	2	-1	-1 0	2 3 0 1 -1
1	3	0	0 0	2 4 0 0 0
1	3	-1	0 0	2 4 1 0 0
1	3	0	0 -1	2 4 0 0 -1
1	3	-1	0 -1	2 4 1 0 -1
1	4	0	0 0	3 4 0 0 0
1	4	0	-1 0	3 4 1 0 0
1	4	0	0 -1	3 4 0 -1 0
1	4	0	-1 -1	3 4 1 -1 0

Рис. 3. Исходная информация о точках структуры

В полупроводниковых материалах квантовые точки вырезаются из структур с квантовыми ямами. Для этой цели служит литография. Однако в том случае, когда необходимо сохранить форму структуры, следует добиться самозарождения зародыша кристаллической квантовой точки. Пример такого зарождения приведен на классическом рисунке, полученном из квантовых точек фирмой IBM. В настоящее время в связи с отсутствием серийных разработок террагер-

цевых генераторов частоты на наноуровне предлагаемая сверхрешетка вполне может регистрировать сигналы (поля), то есть служить в качестве только приемного устройства. Существует еще одна сложная технологическая проблема перехода от наноуровня к микроуровню. Речь идет о контактах, с помощью которых можно подключить измерительные приборы, источники энергии или любые элементы в наносхеме. Для этого используется механически контролируемый разрыв, позволяющий измерять электропроводность наноструктур вплоть до отдельных молекул-проводников, замыкающих этот разрыв. В частности, к исследованной нами наноструктуре антрацена можно «прикрепить» на ее поверхности молекулы тиола SH, так как известна хорошая способность атомов серы, входящих в молекулы-проводники, реагировать с золотом [3].

Предлагается ряд последовательных этапов технологии сборки реальной наносхемы, включающей предфрактальную сверхрешетку:

провести по возможности априорный квантовомеханический расчет распределения токов в решетке и расчет основных ее характеристик, в частности, Фурье-образов структуры квантовых точек и токов. В классическом варианте последнее коррелирует с понятиями дифракционной картины и ДН радиоданной;

произвести поиск материалов для основы фрактальной «решетки»;

выбрать наноструктуры, в качестве элемента антенны (или отражателя), симметрия которой соответствует симметрии этой непериодической сверхрешетки;

проанализировать системы координационных поверхностных связей основы и наноструктуры на предмет их совместимости. Решить проблему контактов;

разработать процедуру «посадки» нанометровых элементов фрактальной структуры на основу с помощью атомно-силового микроскопа;

разработать методику проектирования технологической схемы серийной сборки устройства;

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований.

Библиографический список

1. Рау, В. Г. / В. Г. Рау [и др.] // Кристаллография, 2002. Т. 47. – С. 793.
2. Никитин, О. Р. Моделирование фрактальных структур, антенн и излучателей для

нанотехнологий / О.Р. Никитин [и др.] // Известия института инженерной физики. Серпухов. – 2010. – № 1, (15). – С. 61- 65.

3. Лозовский, В. Н. Нанотехнология в электронике. Введение в специальность: учеб. пособие. – 2-е изд. испр. / В.Н. Лозовский, Г.С. Константинова, С.В. Лозовский. – СПб.: Лань, 2008. – 336 с. – ISBN 978-5-8114-0827-6.

О.Р. Никитин, В.Г. Рау, Н.Н. Корнеева
Владимирский государственный университет

К.В. Скворцов

Владимирский государственный гуманитарный университет

ФРАКТАЛЬНЫЕ АНТЕННЫ ИЗ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК

Представлен начальный анализ поверхностных связей упаковочных полиэдров роста и наноструктур для решения проблемы их совместимости при эпитаксии с применением комплекса программ компьютерного наноскопа. В данной статье рассмотрим пример такого анализа.

Современные технологии в нанoeлектронике позволяют создавать не только отдельные квантовые точки и нанопроволоки, но и трехмерные многослойные наногетероструктуры с точечной симметрией. Подход, предлагаемый в проекте, заключается в том, чтобы использовать «технологии», созданные самой природой, и, моделируя их, обнаружить в расшифрованных структурах ионных, металлических, молекулярных, кристаллических соединений такие закономерности внутренних и поверхностных связей и упаковок, которые позволят выделить необходимые кластеры, «нанослои» и другие фрагменты для нанотехнологии. На первом этапе проводится генерация модели структуры либо методом дискретного моделирования (если структура неизвестна), либо на основе банков кристаллических структур, а на втором этапе – исследование на наноуровне системы связей, раскрывающей процессы образования наноструктур и возможности производства гетероструктур. На третьем этапе разрабатывается проект устройств и технологии сборки наносистем.

Разработанный ранее (см. список публикаций) компьютерный вариант модели по-

слойно-секториального роста представляет собой радиальный алгоритм последовательной сборки трехмерного полиэдра, производимой слой за слоем из элементов упаковки периодической структуры (атомов, молекул, кластеров и т.д.), входящих в элементарную ячейку. Применение трехмерной программы сборки показало, что как для модельных, так и для реальных структур результаты роста зависят от того, на какие фрагменты разбивается содержимое фундаментальной области и какова координация каждого фрагмента. Этот этап называется *кластеризацией* ячейки.

При расчетах многогранника роста графа для конкретной структуры центр масс каждой независимой кластерной формы заменяется «цветной» точкой таким образом, чтобы координация точек (граф соседства) соответствовала разбиению ячейки на кластеры. Для любого из вариантов кластеризации в программе предусмотрен расчет «магических» чисел заполнения координационных сфер точками, которые для простейших многогранников отражают принцип плотной упаковки и определяют дизайн поверхности

каждой грани роста. В настоящее время начат систематический анализ форм роста упаковочных полиэдров для структур различных классов соединений вместе с координационными числовыми последовательностями (КЧП) заполнения точками поверхности многогранника. При моделировании процессов генерации структур и упаковочных полиэдров роста наноструктур впервые рассмотрено построение спектра многогранников роста на конкретных примерах реальных структур: трехмерной структуры галогенидов типа NaCl, кристаллов комплексных соединений с карбамидом, полиморфных модификаций моноклинной и ромбической серы [2], антрацена [1], меди и др. Следует отметить, что, рассчитанные по предлагаемому в заявке программам нанокластеры соответствуют экспериментальным данным масс-спектропии, приведенным в литературе для галогенидов и металлических наноструктур с ГЦК кристаллической ячейкой. Для структур молекулярных соединений такие данные полностью отсутствуют и компьютерное моделирование остается единственным методом прогнозирования наноструктур этого класса.

Используя знание структуры квантовой точки кристаллического зародыша (рис.1), рассчитанной по рецептам [1] для меди (ГЦК с параметрами $a = 3,6074 \text{ \AA}$), предложим модель фрактального нанообъекта – фрактальной наноантенны в виде неперидической сверхрешетки с симметрией оси четвертого порядка. Антенна построена на основе предфрактала – второй итерации фрактала, принцип построения которого, в свою очередь, легко понять из рис.2. В наноскопе направленная сборка антенны (рис. 3) произведена посадкой наноструктурных зародышей меди на поверхности основы кристалла-диэлектрика (димерный кластер NaCl [1], ф.гр. $Fm\bar{3}m$, $a = 5,628 \text{ \AA}$).

Закон послойного роста определяется числовой последовательностью $N_k = 12, 42, 92, \dots, = 10k^2 + 2$. Четыре цвета обозначают положения атомов в различных позициях в ячейке ГЦК: $(0,0,0)$; $(0, \frac{1}{2}, \frac{1}{2})$; $(\frac{1}{2},$

$0, \frac{1}{2})$; $(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0)$.

С помощью нанокластеров меди можно собрать фрактальную антенну и рассчитать ее характеристики.

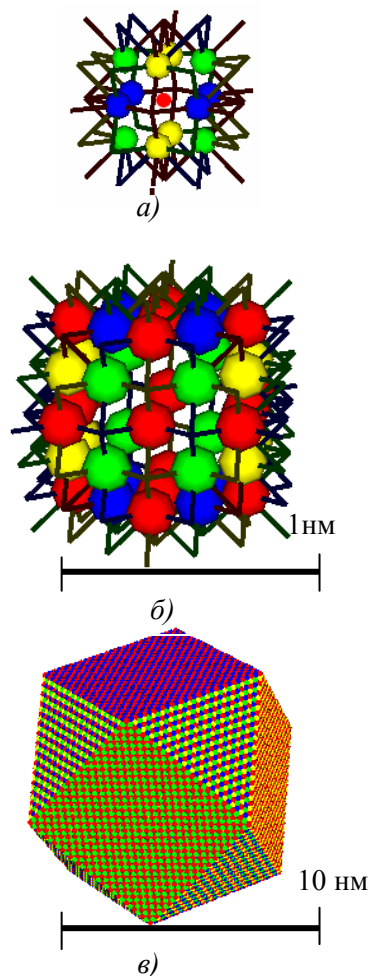


Рис. 1. Кубооктаэдр меди: две координационные сферы с 12(а) и 42(б) атомами на поверхности с координационными связями; 3D-упаковочный многогранник роста меди (в), зародыш которого содержит 9002 атома на поверхности

Представим формально процедуру сборки фрактальной структуры с помощью хорошо известной в математике операции свертки функций. Геометрический смысл свертки адекватно отображает копирование как трансляционный перенос точек одной функции по точкам другой и последующее перемножение соответствующих весов точек обеих функций.

В общем случае вместо каждой точки первой и второй функций можно задать некоторые области (множества точек с весами)

в пространстве и тогда свертка будет представлена областями, составляющими по площади размеры значительно большие, чем размеры областей, составляющих отдельно взятую функцию (аналог произведения электронных плотностей атомов в РСА).

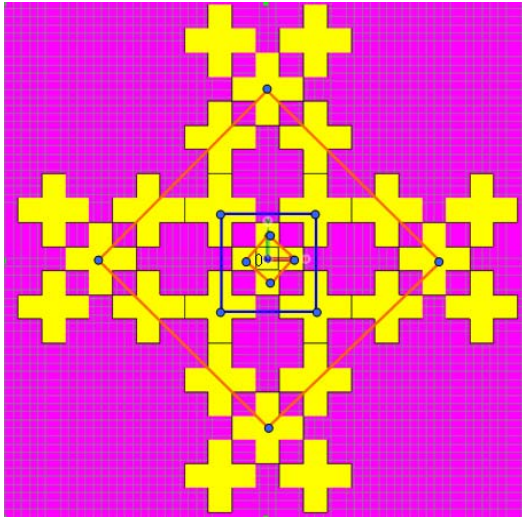


Рис. 2. Этапы сборки фрактальной структуры с симметрией оси четвертого порядка на основе операции свертки

Но если области, составляющие одну из свертываемых функций, будут единичными точками, то размеры областей в свертке будут соответствовать размерам (и форме) областей, составляющих другую функцию.

Поэтому результат свертки функции φ_1 , выбранной в форме элементарного желтого квадрата, изображенного в центре рис. 2, с функцией φ_2 , выбранной в форме точек (вершин и центра) малого квадрата, выделенного на рисунке жирной линией, будет представлять собой новую функцию $\rho^{(i)}$ в виде центрального желтого креста из пяти элементарных квадратов. Индекс, записанный в скобках свертки, характеризует i -ю итерацию сборки. Если ввести операцию поворота \hat{R}_8 точечной структуры на угол 45° как элемент группы поворотов оси восьмого порядка, а также коэффициент увеличения (гомотетии) k при переходе от структуры точек функции φ_2 к $k\varphi_2$, то любую итерацию построения фрактальной структуры можно представить следующим образом:

$$\rho_i = \begin{cases} \rho_{i-1} \otimes k_i \hat{R}_8 \phi_1, & i = 2n; \\ \rho_{i-1} \otimes k_i \phi_1, & i = 2n + 1. \end{cases}$$

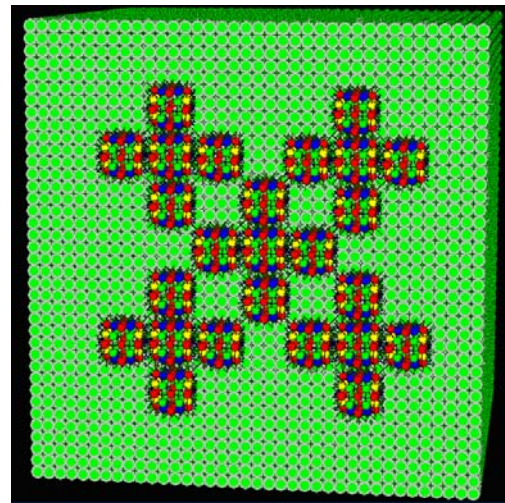


Рис. 3. Сборка фрактальной антенны в компьютерном наноскопе: нанокластеры меди на грани (001) каменной соли

Ожидалось, что полученный нанобъект должен характеризоваться полем рассеяния в ближней зоне, состоящим из большого числа лепестков за счет интерференции. Пока еще практически не решенная проблема создания террагерцевого генератора в нанометровом диапазоне затрудняет решение задачи доведения до конца разработки проекта приемно-передающего устройства на наноуровне. Тем не менее, масштабная инвариантность фрактальных свойств рассматриваемой антенны, которая «запитана» (с сохранением симметрии оси четвертого порядка) от источника с ТГц-частотами, позволяет дать достаточно адекватный анализ работы аналогичной по форме реальной антенны миллиметровых размеров, питающейся от источника с гигагерцевой частотой. Действительно, так как ДН антенны является Фурье-образом системы токов, а распределение токов соответствует симметрии рассматриваемой антенны, то сама природа токов (токи туннельные, сверхпроводящие или обычные) становится не существенной для определения геометрии диаграммы направленности. Подробные диаграммы направленности антенны с симметрией оси 4-го порядка опубликованы в работе [2].

Библиографический список

1. V.G.Rau, A.A.Pugaev, T.F.Rau. A.V.Maleev . Geometrical Aspect of Solving the Problem of Real Structure Growth on the Model of Alkali Metal Halides of the NaCl Type . ISSN 1063-7745, Crystallography Reports, 2009, Vol. 54, No. 7. pp.28-34.

2. Никитин О.Р. Моделирование сборки фрактальных наноструктур для управляемых приемно-передающих устройств / О.Р. Никитин [и др.] // Известия института инженерной физики. Серпухов. – 2010. – № 3. С. 39 - 43.

А.В. Романов, Е.Н. Талицкий

Владимирский государственный университет

ПОЛИМЕРНАЯ МАТРИЦА ДЛЯ ВИБРОПОГЛОЩАЮЩИХ НАНОПОЛИМЕРОВ

Представлены результаты получения полимерной матрицы для разработки вибропоглощающих нанополимеров. Использование полимерной матрицы позволит обеспечить эффективное демпфирование в широком температурном диапазоне. Рекомендован материал для использования в качестве полимерной матрицы для введения углеродных наночастиц.

Многие изделия транспортных средств при эксплуатации подвергаются интенсивным вибрационным и ударным воздействиям. Одним из возможных путей обеспечения надежности таких изделий является установка демпферов из специальных вибропоглощающих (ВП) полимеров в виде слоев, ребер, вставок [1]. Для этого требуются специальные полимеры, обладающие как необходимыми технологическими и эксплуатационными свойствами, так и высокими демпфирующими свойствами в широких температурном и частотном диапазонах. Однако в настоящее время такие отечественные материалы практически отсутствуют.

В последнее время при разработке таких материалов начинают применять современные методы, основанные на использовании различных наночастиц (нанотрубок, нановолокон). В мире в данном направлении работает несколько групп исследователей, в том числе Renesselaer Polytechnic University

(США, Нью-Йорк), Martin- Luther- Universities Halle – Wittenburg (Германия), Toyota Prefectural University (Япония) и др. Все перечисленные группы исследователей сходятся во мнении, что применение полимеров с наночастицами, и в первую очередь углеродных нанотрубок (УНТ), приводит к значительному повышению демпфирующей способности полимеров [2, 3]. Благодаря уникальным свойствам углеродных наночастиц появляется возможность значительно расширить температурный диапазон, при котором композит УНТ/полимер будет эффективен как демпфирующий полимерный материал.

Во Владимирском государственном университете совместно с НПФ «Адгезив», (г. Владимир) проводятся работы по созданию нанополимеров с высокими демпфирующими свойствами на основе полиуретанов. Одной из важнейших задач при этом считается выбор полимерной матрицы для введения УНТ, от которой зависит эффек-

тивность демпфирования получаемого нанополимера в температурном диапазоне.

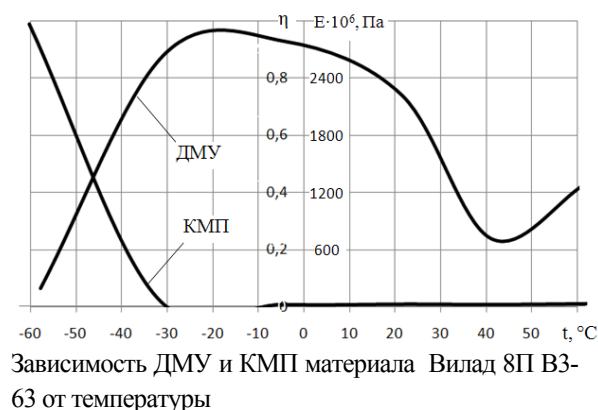
В качестве матрицы была выбрана полиуретановая композиция Вилад 8П В3, состоящая из двух компонентов. Компонент «А» содержит в составе простой олигоэфир, многоатомные спирты, минеральный наполнитель и целевые добавки. Компонент «Б», являющийся отвердителем, представляет собой продукт реакции ароматического изоцианата и простого олигоэфира. В результате данной реакции получается предполимер, содержащий на концах изоцианатные группы.

Пропорция, обеспечивающая стехиометрическое соотношение между гидроксильными группами компонента «А» и изоцианатными группами компонента «Б», составляет 100:70 по массе (Вилад 8П В3-70). Кроме того, были получены образцы материала с соотношением компонентов «А» и «Б», отличным от оригинального – 100:77 (Вилад 8П В3-77) и 100:63 (Вилад 8П В3-63).

Испытания образцов материалов Вилад 8П В3-70, Вилад 8П В3-77 и Вилад 8П В3-63 проводились методом резонансных колебаний консольно закрепленного образца [1] в диапазоне температур от -60 до +60 °С в климатической камере PSL-4КРН. Определялись зависимости динамического модуля упругости (ДМУ) и коэффициента механических потерь (КМП) материалов от температуры в указанном диапазоне. Результаты испытаний представлены на рисунке.

На основе анализа результатов испытаний можно сделать вывод, что среди полученных образцов с различным содержанием компонентов «А» и «Б» наиболее высокие демпфирующие свойства имеет материал Вилад 8П В3-63 с соотношением компонентов 100:63. Максимум КМП материала Вилад 8П В3-63 смещен в область отрицатель-

ных температур и имеет наибольшее значение при -20 °С ($\eta=0,927$). Для данного материала необходимо отметить также довольно широкую температурную зону, в которой КМП не ниже 70 % от максимального значения от -40 до +25 °С. Однако при температурах ниже -50 °С и выше +35 °С КМП имеет достаточно низкие значения, повысить которые возможно добавлением УНТ в исходную матрицу. Материал Вилад 8П В3-63 предполагается в дальнейшем использовать в качестве полимерной матрицы для введения углеродных наночастиц с целью повышения демпфирующих и жесткостных свойств композита в температурном диапазоне от +60 до -60 °С.



Зависимость ДМУ и КМП материала Вилад 8П В3-63 от температуры

Библиографический список

1. Талицкий Е.Н. Защита электронных средств от механических воздействий. Теоретические основы / Е.Н. Талицкий. - Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2001. - 251 с.
2. Koratkar N. Characterizing energy dissipation in single-walled carbon nanotube polycarbonate composites / N. Koratkar, J. Suhr, A. Joshi, R. Kane, L. Schadler // Applied Physics Letters.-2005.
3. Zhou X.. Damping characteristics of nanotube enhanced composites / X.Zho, K.W. Wang, C.E. Bakis // ASME Design Technical Conference.-2003.

М.Ю. Звягин, М.М. Рожков, П.Ю. Шагин
Владимирский государственный университет

К ВОПРОСУ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕКСТУРНЫХ КАРТ ЛАВСА ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ЛИЦ В РАМКАХ ПРОБЛЕМЫ ОДНОГО ЭТАЛОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Затрагивается проблема одного эталонного изображения в задаче распознавания лиц. Предлагается оригинальный подход для решения этой проблемы. Алгоритм использует текстурные энергетические карты Лавса и дискретное косинусное преобразование. Кратко описываются эксперименты проверки эффективности предложенного алгоритма. Приводятся результаты эксперимента и делаются выводы

Обзор проблемы

Технологии биометрической идентификации людей в наши дни получают всё более широкое распространение. С одной стороны, это вызвано возрастающей потребностью в таких технологиях, с другой – расширяющимися возможностями в этой сфере. Основные на распознавании лиц методы идентификации всегда были в центре внимания ученых. Это вызвано в первую очередь неагрессивным характером таких методов по отношению к объектам. Степень точности существующих алгоритмов автоматического распознавания лиц зависит от количества фотографий-ракурсов распознаваемых людей, используемых в системе, так называемых эталонных изображений (sample). Точность системы распознавания падает при уменьшении количества эталонных изображений для каждого человека, используемых системой.

К особенно значительному снижению точности распознавания приводит использование системой только одного эталонного изображения. Однако это зачастую бывает неизбежно. Данная проблема в научном сообществе называется проблемой одного эталонного изображения. За рубежом эта проблема известна под аббревиатурой OSPP («One Sample per Person») [3]. Среди задач автоматического распознавания лиц проблема OSPP занимает особое место.

Постановка задачи

Для процедуры распознавания мы имеем два набора фотографий лиц людей. В каж-

дом наборе содержатся фотографии разных людей [2]. Но для каждого лица в одном наборе есть соответствующее лицо этого же человека в другом наборе. Один набор назовем эталонной базой, а второй – тестовой базой. Задача состоит в том, чтобы для каждого ракурса из тестовой базы найти ракурс того же класса из эталонной базы.

Чтобы сравнивать ракурсы их предварительно определенным образом преобразуют. Из изображения выделяют некоторые величины, по которым в дальнейшем происходит оценка степени похожести ракурсов. Набор таких величин для ракурса будем называть образом ракурса. Зададим на множестве образов метрику. Метрика – некоторая функция, которая ставит в соответствие двум образам число. Назовем это число «расстоянием» между ракурсами.

Технология распознавания основана на методике выбора ближайшего элемента. Для каждого ракурса из тестовой базы будем вычислять «расстояние» до каждого ракурса из эталонной базы. Ракурс с минимальным «расстоянием» будем называть ближайшим ракурсом. Таким образом, для каждого тестового ракурса найдем ближайший эталонный ракурс.

В рамках технологии распознавания ближайший ракурс будет считаться «самым похожим». Если тестовый ракурс и ближайший эталонный ракурс принадлежат одному классу, то распознавание прошло успешно. Если же они из разных классов, то имеет место ошибка распознавания.

Испытания проводились на изображении-

ях, полученных из набора *fafb* базы изображений лиц *COLORFERET*. Тестовые и эталонные изображения были получены из оригинальных изображений базы *COLORFERET* путём вырезания области, содержащей лицо человека. В испытаниях использовались изображения 847 людей (всего $2 \cdot 847 = 1694$ изображения).

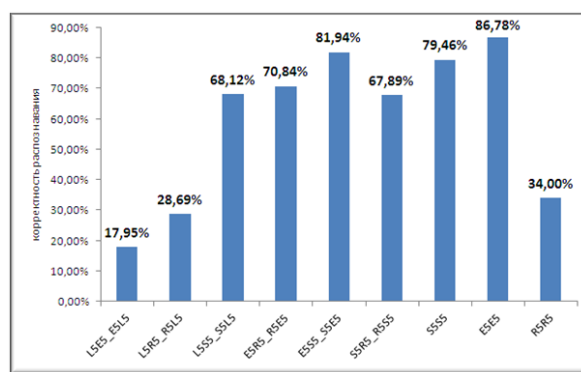
Описание процедуры распознавания

Для построения образа ракурса будем использовать текстурные энергетические карты Лавса. Всего их 9. Подробнее см. [1]. Две однотипные карты Лавса, построенные для различных ракурсов, будем использовать для нахождения расстояния между ракурсами. Карты будем попиксельно сравнивать, применяя метрику L_1 .

Как показал эксперимент [4], наилучшие результаты распознавания (корректность распознавания 86,78 %) дала карта с названием *E5E5*. В целом распознавание с использованием любой из трех следующих карт (*E5E5* – 86,78 %, $\frac{E5S5}{S5E5}$ – 81,94 %, *S5S5* – 79,46 %) показывает весьма приличные результаты. А результат на карте *E5E5* весьма высок в рамках проблемы *OSPP* [3].

Однако карты Лавса – довольно громоздкие конструкции для осуществления по ним быстрого сравнения. Кроме того, они занимают много места в оперативной памяти компьютера. Для решения этого вопроса предлагается использовать дискретное косинусное преобразование (ДКП), примененное к картам Лавса. Дискретное косинусное преобразование используется в алгоритмах сжатия изображений. По низкочастотным коэффициентам ДКП можно восстановить общие черты исходного изображения. А по высокочастотным коэффициентам восстанавливаются мелкие детали. Поэтому для сравнения ракурсов целесообразно использовать низкочастотные коэффициенты преобразования ДКП. Оптимальное количество коэффициентов определим опытным путем. Для вычисления «расстояния» между ракурсами будем использовать метрику L_2 .

Для эксперимента была выбрана карта *E5E5*. К этой карте применялось преобразование ДКП. Число используемых для сравнения коэффициентов изменялось для определения оптимального их количества. Использование преобразования ДКП к лучшей карте Лавса немного снизило корректность распознавания. Для оптимального количества коэффициентов (1081) корректность распознавания составила 84,18 %, что на два с половиной процента ниже, чем в случае попиксельного сравнения самих карт *E5E5* (см. рисунок).



Результаты распознавания на различных картах Лавса

Однако для карт Лавса размером 256×256 пикселей количество сравниваемых величин составляет 65536, что в 60 раз больше, чем для коэффициентов ДКП. Следовательно, использование ДКП, примененного к лучшей карте Лавса, хотя немного и проигрывает в точности, однако значительно выигрывает в скорости работы. И может более успешно использоваться в алгоритмах реального времени.

Библиографический список

1. Стокман Д. Компьютерное зрение / Д. Стокман, Л. Шапиро – М.: БИНОМ; Лаборатория знаний. – 2006.–752 с. – ISBN: 0-13-030796-3; 5-94774-384-1.
2. Голубев А.С. Аппаратно-программный комплекс автоматической регистрации и биометрической идентификации людей / А.С. Голубев [и др.] // Материалы XVII Всероссийской научно-методической конфе-

ренции «Телематика 2010». [электронный ресурс]: URL: http://tm.ifmo.ru/tm2010/db/doc/get_thes.php?id=210 (дата обращения 17.11.10).

3. X. Tan, S. Chen, Z. Zhou, F. Zhang. Face Recognition from a Single Image per Person: A Survey. // Pattern Recognition. The Journal of the Pattern Recognition Society. 39 (2006),

P. 1725 - 1745.

4. Прокошев, В.Г. Проблема автоматического распознавания лиц с одним эталонным изображением / В.Г. Прокошев, М.М. Рожков, П. Ю. Шамин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. «Информатика. Телекоммуникации. Управление» – СПб. 2010 – №5. С. 13-18.

В.Д. Булаев, С.Л. Лысенко
ФКП ГЛП «Радуга»

С.Ю. Данилов
Владимирский государственный университет

СИСТЕМЫ НАКАЧКИ ЭЛЕКТРОИОНИЗАЦИОННОГО ЛАЗЕРА. ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ

Создана комплексная программа, моделирующая процессы в электроионизационном лазере (ЭИЛ). Модель охватывает процессы распространения пучка электронов в ускорителе, элементах конструкции и в разрядной камере с учетом влияния электрических и магнитных полей; процессы формирования пространственных распределений электрического поля и тока вторичных электронов в разрядной камере. Учитывается самосогласованное взаимодействие пучка ускоренных электронов с пространственным распределением электрического поля в разрядной камере, образованного приложенным напряжением и проводимостью лазерной смеси, образованной, в свою очередь, пучком ускоренных электронов. Программа обеспечивает возможность оперативного изменения параметров лазерной смеси и размеров элементов конструкции ЭИЛ. Результатом расчета являются пространственные характеристики несамостоятельного разряда, совпадающие с данными опубликованных экспериментальных исследований.

1. Введение

В последние годы работы по созданию мощных электроионизационных лазеров (ЭИЛ) значительно сократились, так как интересы ученых были направлены на другие направления исследований, которые требуют меньших финансовых затрат. За период исследований ЭИЛ, в первую очередь на молекуле CO_2 , накопилось множество экспериментальных и теоретических результатов, которые незаслуженно заброшены, хотя могли бы использоваться для совершенствования конструкций ЭИЛ на других молекулах, улучшения их характеристик и получения результатов, недостижимых пока другими видами лазеров. Использование компьютерного моделирования дает возможность с небольшими затратами проанализи-

ровать ранее полученные экспериментальные данные, отобрать наиболее удачные варианты и предложить более совершенные конструкции ЭИЛ.

2. Моделирование

С помощью электроионизационного разряда можно накачивать активные среды значительно больше, чем с помощью самостоятельного разряда и, следовательно, получать большие мощности лазерного излучения. Несмотря на тот факт, что ЭИЛ были созданы 30-40 лет назад, их большая мощность и относительно большая эффективность представляют интерес и сейчас [1]. Оптимизация электродов совместно с оптимизацией электрических и магнитных полей могут дать дополнительное увеличение эффективности

ЭИЛ примерно полуторкратное. Совершенствование техники моделирования CO_2 лазеров представляет возможность использования данных моделей для лазеров на других активных смесях.

Нами разработана комплексная программа «Dose_V», которая одновременно моделирует процессы распространения электронных пучков в ускорителях электронов, элементах конструкции и разрядной камере под воздействием электрических и магнитных полей; процессы формирования пространственного распределения электрического поля и тока вторичных электронов в разрядной камере, при этом учитывается самосогласованное взаимодействие пучка ускоренных электронов с пространственным распределением электрического поля в разрядной камере, сформированного приложенной разностью потенциалов и проводимостью лазерной газовой смеси, сформированной, в свою очередь, пучком ускоренных электронов. Программа реализована на персональном компьютере и позволяет оперативно изменять параметры и свойства конструкции ЭИЛ.

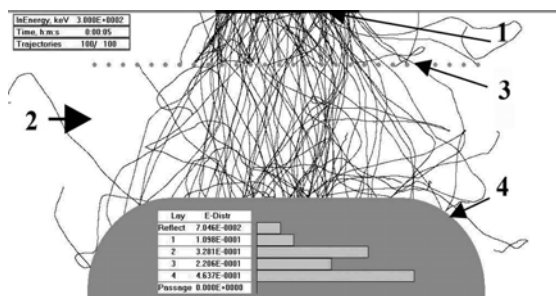


Рис.1. Моделирование электроионизационного лазера: 1 – фольга, 2 – газ, 3 – антистримерная решетка (1,3 - катод), 4 - анод

На рис.1 показана иллюстрация процесса моделирования. Пучок ускоренных в вакууме электронов падает на тонкую фольгу 1 под углами, определяемыми электронно-оптической системой ускорителя. Распространяясь в материале фольги, часть электронов поглощается фольгой, часть отражается назад в вакуум, а основная часть проходит сквозь фольгу и попадает в газовую среду 2. Она заполняет все пространство между

элементами конструкции. Варианты распространения траекторий электронов в газе представлены на рис.1. Траектория движения электронного пучка моделируется как в газе, так и в элементах конструкции (антистримерной решетке, аноде, фольге) до тех пор, пока он в результате неупругих соударений не потеряет свою энергию. Кроме своей первоначальной кинетической энергии, полученной в ускорителе, электроны пучка при движении в газе получают дополнительную энергию от электрического поля, сформированного приложенным к электродам напряжением и проводимостью газовой среды. Реально моделирование траектории электрона прекращалось, если его энергия становилась меньше 3 % первоначальной, при этом остаток энергии поглощался в точке остановки траектории. При своем движении электроны могут сталкиваться с антистримерной решеткой 3, анодом 4, а также возвращаться к фольге 1, при этом возможно поглощение и отражение электронов элементами конструкции.

Для моделирования движения ускоренных электронов используется метод Монте-Карло, позволяющий описывать трехмерное движение в произвольных средах. В основу данного алгоритма положен метод, описанный в [2, 3]. Электроны совершают упругие столкновения с атомами среды распространения. В качестве дифференциального сечения упругого столкновения используем формулу Резерфорда с экранированием. Поправка к параметру экранирования при энергиях электронов более 30 кэВ определяется формулой Нигем [2, 3]. Для энергий менее 30 кэВ используем приближение, аналогичное [4], при этом считаем, что поправка к параметру экранирования не зависит от энергии и равна поправке, определенной формулой Нигем для 30 кэВ. Такое приближение проверялось в [5] для кислорода, азота, аргона, гелия. Оно может быть использовано, пока энергия электрона не уменьшится примерно до 2 кэВ. Средний ионизационный потенциал атомов определяется табличными данными и формулой Штернхеймера [6]. Учет изменения направления движения

электронов во всех неупругих соударениях осуществляется при помощи поправки Фано [7]. Неупругие столкновения учитываются по методу непрерывного замедления с использованием формулы Бете [6].

Данные об энергии и числе электронов, поглощенных элементами конструкции и газовой средой в процессе моделирования, накапливаются в памяти компьютера вместе с координатами для получения статистических данных о пространственном распределении поглощения электронного пучка этими элементами и газовой средой. Плотность поглощенной мощности электронного пучка и цена ионизации газа определяют скорость ионизации газа в единице объема.

Основной механизм гибели электронов – это диссоциативная рекомбинация и прилипание. Зависимость коэффициента диссоциативной рекомбинации и прилипания от напряженности электрического поля взята из работы [8], где она была получена для смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}=1:5:4$. Используя данные для скоростей рекомбинации и прилипания, решая стационарное кинетическое уравнение, находим концентрацию вторичных электронов n_e в электронно-пучковой плазме (ЭПП) аналогично [8]:

$$n_e = \frac{-\beta + \sqrt{\beta^2 + 4 \cdot \alpha \cdot q}}{2 \cdot \alpha}, \text{ где } \alpha - \text{ константа}$$

скорости диссоциативной рекомбинации, β – коэффициент прилипания, q – скорость образования вторичных электронов в единице объема.

Подсчет в процессе моделирования числа электронов, поглощенных в единице объема газа, и ток электронного пучка предоставляют возможность определения скорости накопления пространственного заряда в единице объема = $-e Q$, где e – заряд одного электрона.

Для определения проводимости ЭПП используем полученную в результате моделирования концентрацию вторичных электронов и данные о дрейфовой скорости $v(E)$ [9]. Проводимость ЭПП дает возможность, используя уравнение непрерывности для заряда и разность потенциалов между катодом и

анодом, определить распределение потенциала φ и величины электрического поля \vec{E}

$$\text{div}(\vec{j}) = \text{div}(\sigma \cdot \vec{E}) = -\text{div}(\sigma \cdot \nabla \varphi) = -e \cdot Q,$$

где $\sigma = e \cdot n_e \cdot \frac{v(E)}{E}$ – проводимость плазмы.

Решение данного уравнения осуществляется методом верхней релаксации [10]. Моделирование движения траектории электрона чередуется с однократной прогонкой по всем ячейкам по методу верхней релаксации. В результате моделирования большого количества траекторий электронов набирается и большое количество прогонок метода верхней релаксации. В процессе накопления статистики контролируется невязка потенциала электрического поля, по которой судим о точности полученного решения. По величине невязки определяем достаточно ли данной статистики либо необходимо продолжить испытания.

3. Тестирование программы

Проведено тестирование данной модели прохождения электронных пучков через различные среды. Для начальной энергии электронов 30 кэВ и менее проведено сравнение коэффициента отражения электронного пучка от полупространства, заполненного воздухом, по энергии и числу частиц, рассчитанных по схеме [5] и описанных в [4]. Расхождение не превышало 3 %. Для энергий от 100 до 300 кэВ проведено сравнение коэффициентов отражения, поглощения и прохождения электронных пучков через тонкую фольгу из алюминия и титана, рассчитанных по разработанной программе, с данными [11]. Относительное расхождение коэффициента отражения не превышало 20 % во всем диапазоне энергий и толщин фольги (от 12 до 50 мкм). Большая величина погрешности связана с малой величиной коэффициента отражения. Аналогичная величина относительной погрешности для коэффициента поглощения не превышала 3 %. Относительная погрешность коэффициента прохождения не превышала 1,5 %. Погреш-

ность экспериментальных данных, используемых в [11], составляла 3 %.

Для определения величины поглощенной мощности электронного пучка в единице объема газа необходимо знание доли тока ускорителя, которая попала на фольгу. Именно такие электроны, попавшие на фольгу, учитываются при моделировании. В реальных ускорителях значительная часть электронного пучка попадает на стенки ускорителя, а не на выводное окно (на фольгу). Поэтому только часть полного тока ускорителя участвует в ионизации газа. В случаях, когда известна эта часть, она учитывается при моделировании.

В экспериментальной установке использовался ускоритель с термокатодом в виде натянутых вольфрамовых нитей, имеющий значительный угловой разброс направлений движения электронов. Степень воздействия его на ионизацию газа характеризовалась величиной тока электронного пучка, дошедшего до анода разрядной камеры. Эта величина определялась с помощью пояса Роговского на аноде разрядной камеры при нулевой разности потенциалов на электродах разрядной камеры.

Поскольку при моделировании необходима информация о токе электронного пучка, попавшего на фольгу, то при моделировании в реальной геометрии экспериментальной установки сначала определяется отношение тока до фольги к току на аноде разрядной камеры. Для разработанной экспериментальной установки при ускоряющем напряжении 300 кВ это отношение равно 2,65. То есть для тока на аноде разрядной камеры 5,23 А ток, подающий на фольгу, равен 13,86 А. Для дальнейших расчетов величину тока, падающего на фольгу, фиксировали в памяти компьютера. Это обусловлено тем, что при дальнейшей работе установки, когда на нее будет подано разрядное напряжение, ток разряда значительно превысит ток электронного пучка и измерение его станет невозможным. Кроме того, при наличии напряжения на электродах разрядного промежутка распространение электронного пучка будет отличаться от распро-

странения при отсутствии напряжения на электродах. С этой целью перед проведением эксперимента и при нашем моделировании определяется и фиксируется ток электронного пучка падающего на фольгу, до выхода его в разрядную камеру. Длительность тока электронного пучка составляла 45 мкс.

Основной несамостоятельный разряд запитывался от конденсаторной батареи, напряжение разряда измерялось резистивно-ёмкостным делителем. В процессе разряда напряжение на емкости уменьшалось, а следовательно, и уменьшалось напряжение на электродах разрядного промежутка. Например, при начальном напряжении 105 кВ в конце импульса напряжение на электродах составляло 75 кВ. Поэтому в процессе нашего моделирования на основании рассчитанных пространственных распределений проводимости и напряженности электрического поля в пространстве разрядной камеры определялась поглощаемая мощность основного разряда в зависимости от напряжения на электродах $P(U)$. Уменьшение напряжения на батарее конденсаторов в течение импульса определялось из уравнения

$$CU \frac{dU}{dt} = -P(U), \text{ где } C=8,3 \text{ мкФ} - \text{емкость батареи конденсаторов.}$$

Далее зависимость $P(U)$ интегрировалась по времени импульса с учетом разряда накопительной емкости. В результате получалась величина вкладываемой в разряд энергии за импульс как функция начального напряжения конденсаторной батареи U_0 .

Результат проделанной работы для смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}=1:5:4$ показан на рис. 2. Экспериментальные значения энерговклада определялись по формуле

$$E = \frac{C}{2}(U_0^2 - U_f^2),$$

где U_0, U_f – измеренные начальное и конечное напряжения разряда соответственно.

Существенное совпадение результатов моделирования и экспериментальных данных позволяет использовать приведенную модель для оптимизации и прогнозирования

параметров новых разрабатываемых электроионизационных лазеров. Для сравнения заметим, что использование данных [8] для коэффициента прилипания дает заниженные примерно на 20 ÷ 30 % величины вкладываемой энергии.

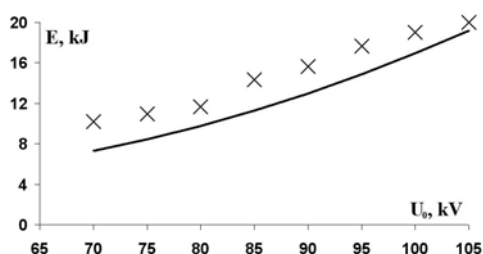


Рис. 2. Расчетная (сплошная линия) и экспериментальная (крестики) зависимости вкладываемой энергии от начального напряжения конденсаторной батареи

Доля погрешности вкладываемой энергии от погрешностей распространения электронного пучка оценивается не более 3 % от максимального значения. Основная погрешность расчета формируется за счет погрешностей коэффициентов прилипания и диссоциативной рекомбинации, а также скорости дрейфа. Экспериментальные значения вкладываемой энергии определены с точностью 15 %. Тем не менее полученные расчетные значения достаточно хорошо соответствуют экспериментальным значениям, то есть используемая модель хорошо описывает исследуемые физические процессы.

4. Результаты численного моделирования

Как результат моделирования получены пространственные характеристики: пространственное распределение мощности вкладки в активную лазерную среду, пространственное распределение поглощенной мощности электронного пучка, сила электронов пучка, пространственное распределение вторичных электронов, пространственное распределение электрических и магнитных полей и ряд других величин.

В качестве примера на рис. 3 - 6 представлены результаты моделирования, отображающие правую симметричную полови-

ну соответствующих пространственных распределений, представленных как топограммы. Геометрия соответствует рис. 1.

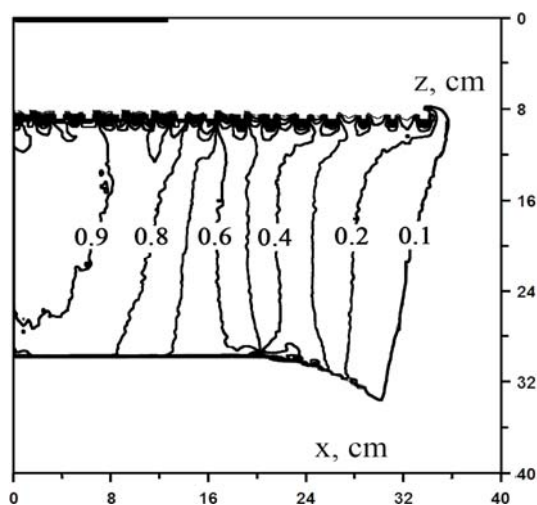


Рис. 3. Пространственное распределение мощности накачки единицы объема в единицах максимальной величины для напряжения катод-анод 105 кВ. Жирная линия вверху слева показывает выводное окно ускорителя электронов (0-12,5 см)

Параметры расчета: начальная энергия электронов пучка – 300 кэВ, ток пучка ускоренных электронов, падающий на фольгу, - 13,86 А, ширина выводного окна - 25 см, фольга - (30 мкм Al+18 мкм Ti).

Разрядная камера. Расстояние от выводного окна до антистримерной решетки – 9 см. Антистримерная решетка представляет собой ряд из 28 нержавеющей трубок диаметром 0,8 см с шагом 2,5 см. Расстояние от выводного окна ускорителя до медного анода – 30 см. Ширина плоской части анода – 40 см. Радиус закругления анода – 15 см. Глубина (размер всех элементов вдоль оптической оси) – 70 см.

На рис. 3 представлено пространственное распределение мощности накачки в единице объема в единицах максимальной величины при напряжении катод-анод 105 кВ. На рис. 4 то же, но для напряжения 70 кВ. В середине разрядной камеры наблюдается некоторое различие в распределениях, вызванное разностью приложенного напряжения.

На рис. 5 представлено пространственное распределение мощности поглощения электронного пучка в единице объема при на-

пряжении катод-анод 105 кВ. На рис. 6 то же, что на рис.5, и в тех же единицах, но при отсутствии напряжения на электродах. Потери пучка в разрядной камере при напряжении 105 кВ на 7 - 8 % меньше, чем без напряжения. Это вызвано тем, что чем выше энергия электронов, тем ниже потери пучка при распространении в среде.

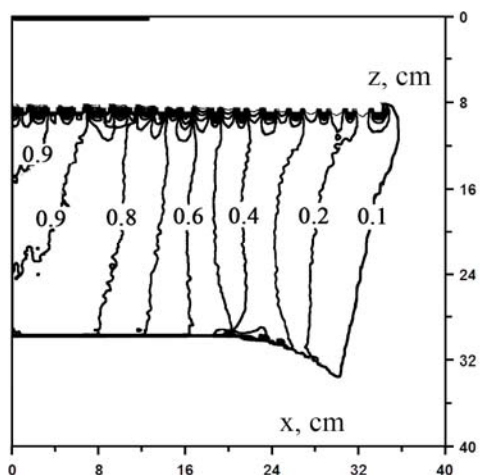


Рис. 4. Пространственное распределение мощности накачки единицы объема в единицах максимальной величины для напряжения катод-анод 70 кВ. Жирная линия вверху слева показывает выводное окно ускорителя электронов (0-12,5 см)

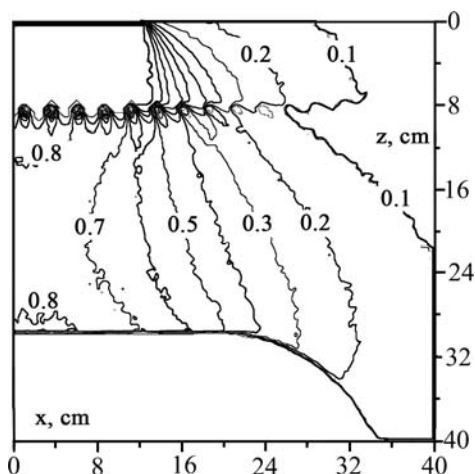


Рис. 5. Пространственное распределение мощности поглощения электронного пучка в относительных единицах при напряжении катод-анод 105 кВ. Жирная линия вверху слева показывает выводное окно ускорителя электронов (0-12,5 см)

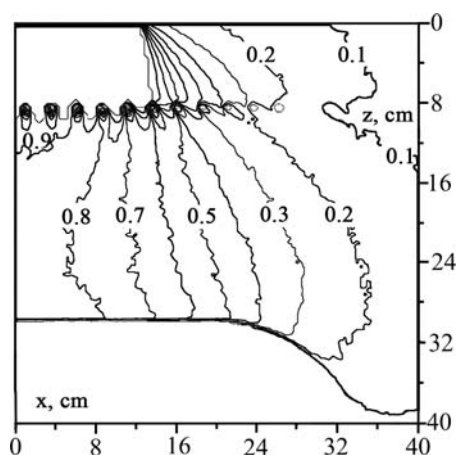


Рис. 6. Пространственное распределение мощности поглощения электронного пучка в единицах рис. 5 в случае отсутствия напряжения на электродах. Жирная линия вверху слева показывает выводное окно ускорителя электронов (0-12,5 см)

5. Заключение

Отработанный алгоритм моделирования может быть использован для моделирования несамостоятельного разряда в любых лазерных смесях и геометриях, которые аппроксимируются двумерными моделями. Для этого в программе организован удобный ввод параметров используемых веществ на основе периодической таблицы и размеров геометрических объектов. В случае использования других смесей необходимо заменить уравнение формирования плотности вторичных электронов на основе их уравнения баланса: образования и гибели. Необходимо добавить зависимость скорости дрейфа электронов от напряженности электрического поля в соответствующей смеси.

Программа предназначена для исследования пространственных характеристик несамостоятельного разряда. Совершенствовать модели возможно за счет применения более сложных кинетических схем для определения плотности электронов плазмы.

Библиографический список

1. W.L. Bohn. Laser propulsion: a futuristic application. 14th International Conference "Laser Optics 2010" St.Petersburg, Russia, June 28 - July 02, 2010.
2. Аккерман, А. Ф. Моделирование траекторий заряженных частиц в веществе /

А.Ф. Аккерман – М.: Энергоатомиздат, 1991. 200 с.

3. Аккерман, А. Ф., Решение методом Монте-Карло задач переноса быстрых электронов в веществе / А.Ф. Аккерман, Ю.М. Никитушев, В.А. Ботвин. – Алма-Ата: Наука, 1972. – 167 с.

4. В. Grosswendt and E. Waibel. Transport of low energy electrons in nitrogen and air. Nuclear instruments and methods, 155 (1978) 145-156.

5. Лысенко, С. Л. Численное моделирование электронно-пучковой плазмы в объеме, ограниченном твердыми стенками: дис. канд. физ.-мат. наук. – М., 2005. – 16 с.

6. Баранов, В. Ф. Дозиметрия электронного излучения / В.Ф. Баранов. – М: Атомиз-

дат, 1974. – 229 с.

7. Spencer L.V. Theory of electron penetration. Phys.Rev., v. 98,p. 1597,1955.(Фано)

8. Глотов, Е.П. Прилипание и рекомбинация в плазме разряда, возбуждаемого электроионизационным методом / Е.П. Глотов, В.А. Данилычев, И.В. Холин // Труды ФИАН, 1980, том 116. С. 188.

9. Физические величины: справочник / под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.

10. Ильин, В. П. Численные методы решения задач электрофизики / В.П. Ильин. – М.: Наука, 1985. – 336 с.

11. Berger M.J., Seltzer S.M. Transmission and reflection of electrons by solids. Nuclear instruments methods, 1974, 119, 1.

В.Д. Булаев, С.Л. Лысенко
ФКП ГЛП «Радуга»

Н.Н. Давыдов

Владимирский государственный университет

СИСТЕМЫ НАКАЧКИ ЭЛЕКТРОИОНИЗАЦИОННОГО ЛАЗЕРА. ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОДНЫХ СИСТЕМ

Одной из основных проблем при создании электроионизационных лазеров является обеспечение максимально возможной напряженности электрического поля в разрядном объеме в пределах апертуры резонатора и достижение максимальной однородности мощности накачки в этом пространстве. Известные типы электродов не являются оптимальными, а рекомендации, устанавливающие отношение ширины электродов к межэлектродному расстоянию как 4:1 являются завышенными. В данной работе показано, что при высокой однородности электрического поля в межэлектродном зазоре в пространстве оптического резонатора неоднородность плотности мощности накачки в сечении разряда может достигать 100 %.

1. Введение

Основными проблемами при создании мощного широкоапертурного электроионизационного лазера (ЭИЛ) являются достижение наиболее возможной напряженности электрического поля в объеме разряда ограниченного апертурой резонатора и получение однородной мощности накачки в этом объеме. По нашему мнению, известные типы электродов, например [1, 2], не являются оптимальными, а рекомендации [3], устанавливающие отношение ширины электродов к межэлектродному расстоянию как 4:1, являются несколько завышенными.

2. Оптимизация электродной системы

Для расчета используется программа «Dose_V», моделирующая систему накачки ЭИЛ. Модель включает численное моделирование следующих процессов:

- распространение ускоренных электронов через фольгу, элементы конструкции лазера, газовую среду;
- формирование проводимости в газовой среде за счет образования в ней вторичных электронов;
- формирование пространственного рас-

пределения электрического поля в газовой среде, которая определяется конфигурацией электродов и проводимостью газа.

Предлагаемый метод оптимизации электродной системы широкоапертурных ЭИ лазеров подтверждён результатами экспериментов и апробирован расчётом результатов, опубликованных в работах [1, 2, 3]. С помощью этой программы была выполнена оптимизация электродной системы электроионизационного CO₂ лазера. Исследованы 13 типов электродов, отличающихся шириной плоской поверхности и радиусами скругления краёв анода, данные о которых представлены в таблице. Вид электродной системы показан на рис. 1.

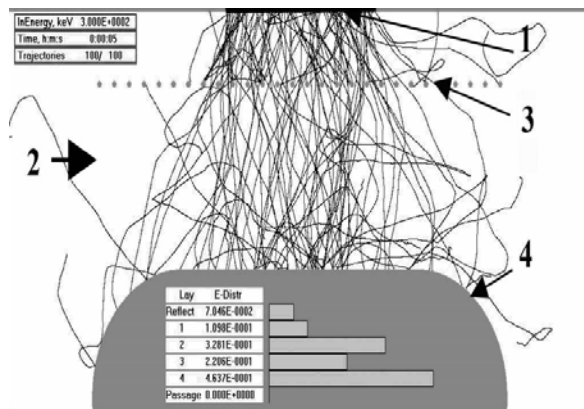


Рис.1. Моделирование электроионизационного лазера: 1 – фольга, 2 – газ, 3 – антистримерная решетка (1,3 – катод), 4 – анод

Полупрозрачный катод представлял собой решётку из медных прутков диаметром 8 мм с шагом 25 мм. Длина электродов вдоль оси резонатора равна 700 мм, расстояние между ними составляло $H=200$ мм. Ускоритель электронов с термонакальным катодом и размерами выводного фольгового окна 250×650 мм формировал пучок электронов с энергией 300 кэВ и с плотностью тока пучка (на аноде) 2 mA/cm^2 . Разделительная фольга двухслойная (15мкм Al + 30мкм Ti), расстояние выводного окна от края катодной решётки составило 9 см. Постоянное напряжение накачки лазера равно 105 кВ, ёмкость конденсаторной батареи 25 мкФ, длительность импульса накачки равна длительности импульса тока пучка быстрых электронов и составила 45 мкс.

Критериями эффективности конструкции электродов являлись: 1) отношение энерговыклада в заданный объём резонатора E к энерговыкладу в заданный объём резонатора E_0 для оптимальной конструкции анода E/E_0 ; 2) отношение полного энерговыклада W к полному энерговыкладу W_0 для оптимальной конструкции анода W/W_0 . Расчёт осуществлён для двух объёмов, охватываемых резонатором, с поперечным сечением лазерного пучка 200×250 мм и 200×400 мм, длины резонаторов идентичны. В качестве оптимальной конструкции анода принят анод № 7. Это следует из нижеприведенных зависимостей.

На рис. 2 и 3 представлены величины E/E_0 и W/W_0 для этих двух вариантов в относительных величинах.

Из графиков следует, что в обоих случаях оптимальным является анод с шириной плоской части, равной двум расстояниям анод-катод ($A:H \approx 2:1$), при радиусе скругления краёв анода $R=15$ см.

Применение анодов с большей шириной A и радиусами скругления R нецелесообразно, так как с увеличением размеров анода энерговыклад в объём резонатора не растёт, хотя полный энерговыклад несколько возрастает. Кроме того, увеличение ширины анода создаёт дополнительные проблемы, связанные с необходимостью увеличения размеров разрядной камеры.

Параметры анодов

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
A, см	1	1	1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R, см	6	9	3	3	2	2	1	1	1	1	1	1	15

A – ширина плоской части анода,
 R – радиус скругления краёв анода,
 № – номер анода.

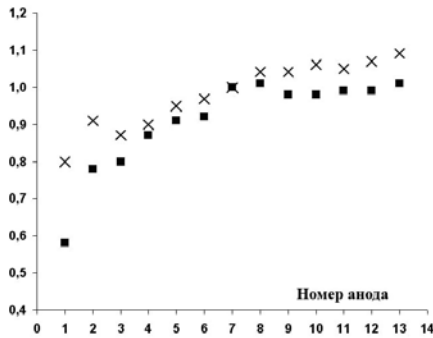


Рис. 2. Отношение энерговкладов для сечения лазерного луча 200×250 мм

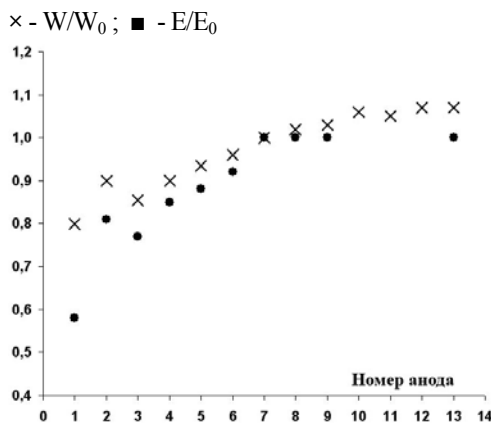


Рис. 3. Отношение энерговкладов для сечения лазерного луча 200×400 мм. x - W/W_0 ● - E/E_0

Для графика рис. 3 для анодов № 10 - 12 (см. таблицу) вычисления не выполнялись.

Результаты расчётов подтверждены также для различных лазерных смесей, материалов и толщины фольги ускорителя, расстояния выводного окна ускорителя от края катодной решётки. Однако применение фольги ускорителя с малым атомным номером (майлар) и малой толщиной позволяет несколько уменьшить соотношение $(A:H) \leq 2$. Увеличение же расстояния выводного окна от края катодной решётки позволяет улучшить распределение плотности мощности накачки по межэлектродному объёму, но требует соблюдения соотношения $(A:H) \geq 2$.

Корректность расчётов подтверждена сравнением с результатами работ [1,2], в которых приведены технические и геометрические параметры конструкции. Пример распределения плотности мощности для работы [1] приведён на графике рис. 4, а на рис. 5 выполнен график сравнения расчётно-

го распределения мощности накачки по высоте разрядного промежутка в центре разрядной камеры в сравнении с распределением коэффициента усиления работы [1] (в относительных единицах).

Из рис. 4 видно, что имеется значительная неоднородность накачки по объёму резонатора апертурой 135×260 мм с максимумом, несколько смещённым к аноду от центра разрядного объёма. Эти результаты также подтверждаются сравнением (в относительных единицах) распределения коэффициента усиления (рис. 5) [1] с полученным расчётным распределением накачки в центре вдоль оси «катод - анод» разрядного промежутка, расхождение в среднем не превышает 12 %.

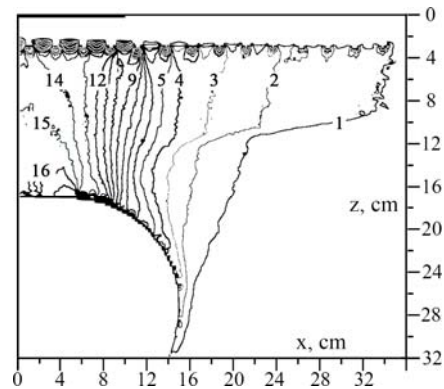


Рис. 4. Результаты расчета. Правая симметричная половина распределения плотности накачки для работы [1]. Числа на линиях уровня в kВт/см^3 . Жирная горизонтальная линия справа сверху показывает выводное окно ускорителя

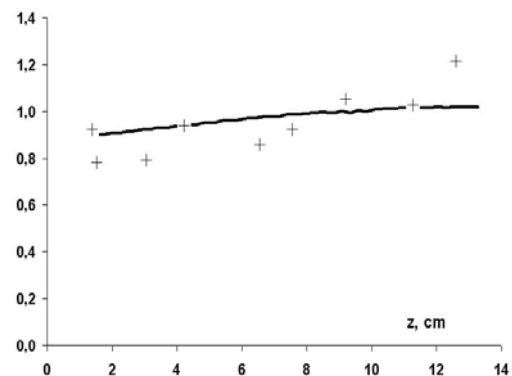


Рис. 5. Сравнение вычисленного распределения мощности накачки по высоте разрядного зазора вдоль оси разрядной камеры (сплошная линия) и распределение коэффициента усиления из работы [1] (крестики) в относительных единицах

Результаты вычислений сопоставлены с данными, приведенными в работе [2], так как геометрия конструкции и основные параметры расчётов и экспериментальных стенов аналогичны. При этом в работе [2] отмечено, что увеличение размеров анода приводит к значительному (до 60 %) увеличению напряжённости электрического поля в прикатодной зоне (у границы электронного пучка), обусловленному градиентом электронной концентрации в направлении катод - анод, а также к значительному (до 50 %) увеличению потерь в периферийной зоне разряда.

Выполнены 2 варианта расчётов: 1 - вариант [2]; 2 - оптимальный вариант конструкции, соответствующий аноду №7 (см. таблицу). Результаты расчётов приведены на рис. 6 и 7. В расчёте приняты следующие допущения: рабочее вещество – азот при атмосферном давлении; средняя энергия электронов 200 кэВ; плотность тока за катодом 2 mA/cm^2 ; прилипание отсутствует; разделительная фольга ускорителя из алюминия толщиной 30 мкм; средняя напряжённость поля разряда $3,5 \text{ kV/cm}\cdot\text{atm}$. В варианте 1: электроды шириной 320 мм; радиус закругления анода 2 см; расстояние между ними 200 мм. В варианте 2: электроды оптимальные (конструкция №7 в таблице).

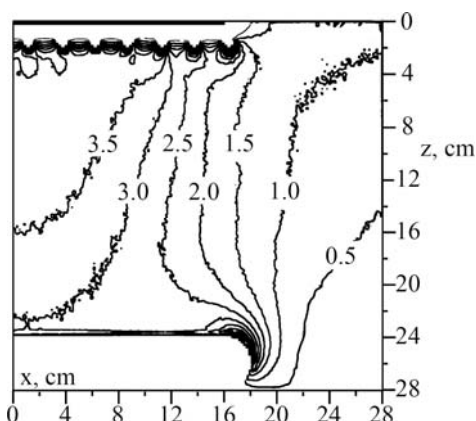


Рис. 6. Расчет мощности накачки по варианту 1. Правая симметричная половина. Числа на линиях уровня в kВт/см^3 . Жирная линия вверху справа показывает выводное окно ускорителя

Сопоставление результатов расчёта с данными [2] показывает, что при схожем

характере картин распределения накачки в центральной части разрядного промежутка в обоих случаях картины распределения накачки на границах разряда значительно различаются, особенно в области сопряжения плоской и цилиндрической частей анода. Кроме того, отсутствует значительный градиент на границе электронного пучка - имеется лишь характерный спад к краю распространения, к тому же максимум накачки расположен в центре разрядного промежутка. Причины расхождения требуют более детального анализа метода измерения плотности поглощения электронного пучка [2], по которому определялась концентрация электронов в разряде.

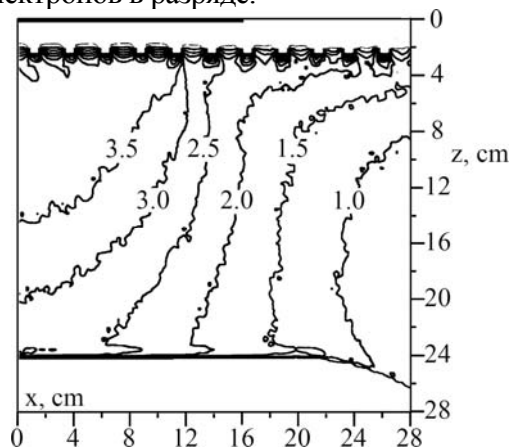


Рис. 7. Расчет мощности накачки по варианту 2. Правая симметричная половина. Числа на линиях уровня в kВт/см^3 . Жирная линия вверху справа показывает выводное окно ускорителя

Плотность распределения накачки в оптимальном случае практически однородна по всему объёму ($200 \times 320 \text{ мм}$). Подтверждается также вывод авторов [2] о некотором возрастании накачки вне апертуры $200 \times 320 \text{ мм}$, однако доля энерговклада в объём $200 \times 320 \text{ мм}$ сохраняется неизменной. Из практики экспериментов известно, что неоднородность электрического поля, попадающая в зону накачки (вариант 1), значительно снижает возможность достижения предельных энергий накачки из-за развития стримерного пробоя в этих зонах. Поэтому при прочих равных условиях вариант 2 является предпочтительным при применении разряда как в азоте, так и в лазерной смеси.

Эксперименты проведены на импульсном ЭИ CO_2 лазере с атмосферным давлением лазерной смеси состава $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}=1:5:4$; расстояние между электродами равно 210 мм, соотношение плоских частей электродов по отношению к межэлектродному расстоянию $A:H \approx 2$. Применялись два типа резонаторов, у которых объём накачки, охватываемый резонатором, равен $200 \times 250 \times 700 \text{ мм}^3$ и $200 \times 400 \times 700 \text{ мм}^3$. Энергия быстрых электронов менялась от 200 до 350 кэВ, плотность электронного тока - от 1 до 5 мА/см², длительность импульса от 10 до 50 мкс. Напряжение варьировалось от 50 до 130 кВ и подавалось на анод лазера от конденсаторной батареи ёмкостью 25 мкФ. Сравнение экспериментальных и расчётных результатов по полному энерговкладу в разрядный объём лазера дало следующие результаты. Измеренные значения энерговклада в среднем на 17 % превышают расчётные значения по предлагаемому методу, что находится в зоне суммарных погрешностей измерений электрических параметров и параметров ускорителя электронов (± 20 %). По численным расчётам в зону резонатора $200 \times 250 \times 700 \text{ мм}^3$ в среднем попадает ~ 50 %, а в зону резонатора $200 \times 400 \times 700 \text{ мм}^3$ ~ 70 % от полной энергии накачки.

Сравнение результатов [3] с полученными данными показало, что электроды с соотношением плоских частей электродов $A:H \geq 2$ находятся за пределами оптимальных размеров.

3. Заключение

Таким образом, в результате численного моделирования процессов разряда в широкоапертурном электроионизационном CO_2 лазере найдена оптимальная конфигурация электродов, у которых соотношение плоских частей $A:H \approx 2$. Показано, что даже при высокой однородности электрического поля в межэлектродном объёме, охватываемом оптическим резонатором, неоднородность плотности мощности накачки в поперечном сечении разряда может достигать 100 %. Оптимальная конфигурация электродной системы

для данной конструкции лазера сильно зависит от толщины и материала фольги ускорителя, расстояния выводного окна ускорителя до края катодной решётки, отношения ширины электродов к межэлектродному расстоянию и слабо зависит от состава и параметров лазерной смеси.

Библиографический список

1. Глотов, Е. П. Эффективность использования электронного пучка в импульсно-периодических электроионизационных CO_2 лазерах и комплексная оптимизация параметров их возбуждения / Е. П. Глотов, В.А. Данилычев, Н.В. Чебуркин // Труды ФИАН, 1983. Т.142. – С. 3.
2. Бойков, Е. С. Исследование пространственных характеристик объемного разряда атмосферного давления, контролируемого электронным пучком / Е.С. Бойков, В.В. Минин, Б.П. Яценко // Физика плазмы. 1984, Т. 10, вып. 5. – С. 1021.
3. Mann M.M., AIAA Paper, №34, 18, (1975).
4. Аккерман, А. Ф. Моделирование траекторий заряженных частиц в веществе / А.Ф. Аккерман. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 200 с.
5. Аккерман, А. Ф. Решение методом Монте-Карло задач переноса быстрых электронов в веществе / А. Ф. Аккерман, Ю. М. Никитушев, В. А. Ботвин. – Алма-Ата: Наука, 1972. 167 с.
6. В. Grosswendt and E. Waibel. Transport of low energy electrons in nitrogen and air. Nuclear instruments and methods, 155 (1978) 145-156.
7. Лысенко, С. Л. Численное моделирование электронно-пучковой плазмы в объеме, ограниченном твердыми стенками: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – М., 2005.
8. Баранов, В. Ф. Дозиметрия электронного излучения / В. Ф. Баранов. – М.: Атомиздат, 1974. – 229 с.
9. Spencer L.V. Theory of electron penetration. Phys.Rev., v. 98,p. 1597,1955.(Фано).
10. Глотов, Е.П. Прилипание и рекомбинация в плазме разряда, возбуждаемого электроионизационным методом / Е.П. Гло-

тов, В.А. Данилычев, И.В. Холин // Труды ФИАН, 1980. Т. 116. – С. 188.

11. Физические величины: справочник / под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. –

М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.

12. Ильин, В.П. Численные методы решения задач электрофизики / В.П. Ильин. – М.: Наука, 1985. – 336с.

В.Д. Булаев, С.Л. Лысенко

ФКП ГЛП «Радуга»

В.Г. Прокошев

Владимирский государственный университет

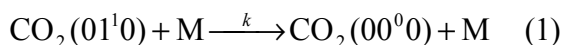
ИССЛЕДОВАНИЕ БЕЗГЕЛИЕВЫХ СМЕСЕЙ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОИОНИЗАЦИОННЫХ CO₂ ЛАЗЕРОВ

Исследуются режимы работы электроионизационного импульсно-периодического CO₂ лазера на смесях CO₂:N₂:H₂O. Основные результаты исследований состоят в том, что при равных энергиях излучения эффективность на смесях CO₂:N₂:H₂O приблизительно на 25 % меньше, чем на смеси CO₂:N₂:He. Уменьшение эффективности компенсируется увеличением напряженности электрического поля на смесях, содержащих H₂O, как в импульсном, так и в импульсно-периодических режимах.

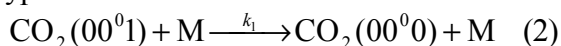
Технологические

электроионизационные (ЭИ) CO₂ лазеры, как правило, функционируют на смесях, содержащих He. Применение гелия в смесях предопределяет увеличение скорости расселения нижнего лазерного уровня и повышение теплоёмкости смеси. Кроме гелия, достаточно высокими скоростями расселения уровня 01¹0 CO₂, определяющими скорость расселения нижнего лазерного уровня (10⁰0, 02²0), обладают также водород, дейтерий и вода. Константы скорости процесса для них представлены в таблице [1]:

M	He	H ₂ O	H ₂	D ₂
$K, \text{Top}^{-1} \cdot \text{c}^{-1}$	$3,8 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^5$	$8 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4$
$K_I, \text{Top}^{-1} \cdot \text{c}^{-1}$	68	$4 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^3$	270



Однако в отличие от He эти молекулы эффективно расселяют и верхний лазерный уровень:



Данный процесс характеризуется кон-

стантами, также представленными в таблице [2].

Известны работы [1, 2], в которых подробно исследованы режимы генерации ЭИ CO₂ лазера на смесях, содержащих водород. В них показано, что в ЭИ CO₂ лазере при замене He на H₂ достигаются соизмеримые параметры излучения и КПД, особенно при коротких ≤ 1 мкс импульсах накачки. При длительностях импульса накачки в десятки микросекунд в смесях, в которых гелий был заменён на водород, при оптимальных уровнях накачки КПД генерации ниже, чем в смесях с гелием. При этом концентрация водорода в смеси составляет 1÷3 %.

В данной работе исследовались режимы работы ЭИ CO₂ лазера импульсно-периодического действия на смесях CO₂:N₂:H₂O в сравнении со смесью CO₂:N₂:He (рис. 1 – 3). Во всех экспериментах рабочее давление смеси было равно атмосферному. Для приготовления лазерных смесей применялись газы как особо чистые с суммарным содержанием примесей (в основном O₂, H₂O) $\leq 0,1$ %, так и газы технической чистоты с содержанием O₂ 0,4÷1 %. Конструкция лазера подобна [3], отличие лишь в том, что объём лазерной камеры, ох-

ватываемой резонатором, был равен $200 \times 400 \times 700$ мм³ (межэлектродное расстояние) \times (ширина вдоль потока лазерной смеси) \times (длина вдоль оптической оси резонатора). В качестве ионизатора применялся ускоритель с термоэмиссионным катодом с прямым подогревом, выводное окно которого закрыто двухслойной фольгой (Al+Ti), суммарная толщина фольги равна 38 мкм.

Ускоряющее напряжение изменялось в диапазоне 250-300 кВ, ток электронного пучка, измеряемый на аноде разрядной камеры, составлял 3-5 А, длительность импульса тока – 40÷45 мкс. Напряжение накачки активной среды лазера варьировалось в диапазоне 60÷120 кВ и подавалось от конденсаторного накопителя с суммарной ёмкостью 25 мкФ.

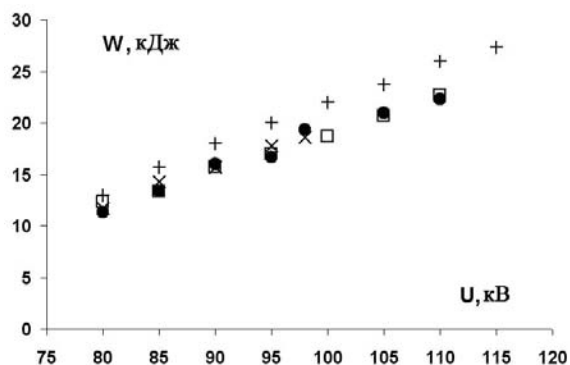


Рис. 1. Зависимость энерговклада от напряжения разряда:

- + - смесь $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{H}_2\text{O}=1:9:0,25\%$;
- - смесь $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{H}_2\text{O}=1:7:0,1\%$;
- - смесь $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{H}_2\text{O}=1:6:0,1\%$;
- × - смесь $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}+\text{O}_2+\text{H}_2\text{O}=1:5:2 + 0,1\%\text{O}_2 + 0,05\%\text{H}_2\text{O}$

Исследования проводились как в импульсном, так и в импульсно-периодическом режимах на частотах от 50 до 100 Гц. Импульсно-периодический режим обеспечивался прокачкой лазерной смеси перпендикулярно оптической оси лазерного резонатора через разрядную камеру со средней скоростью 100 м/с.

Основные результаты исследований заключаются в том, что при равных энергиях излучения КПД на смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{H}_2\text{O}$ примерно на 25 % ниже, чем на смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}$.

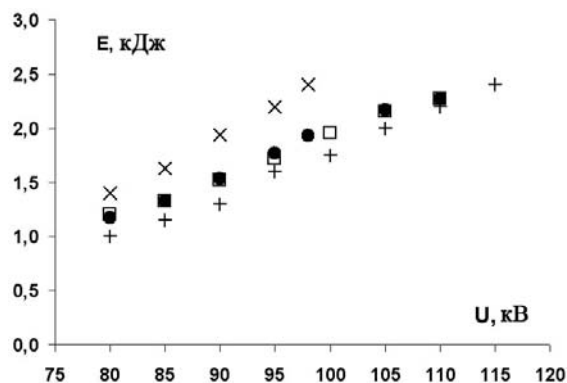


Рис. 2. Зависимость энергии излучения от напряжения разряда:

- + - смесь $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{H}_2\text{O}=1:9:0,25\%$;
- - смесь $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{H}_2\text{O}=1:7:0,1\%$;
- - смесь $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{H}_2\text{O}=1:6:0,1\%$;
- × - смесь $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}=1:5:2$

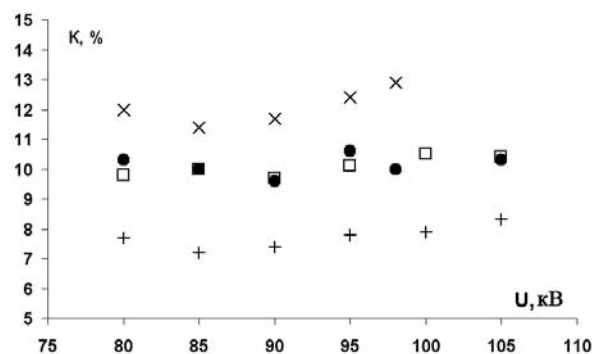
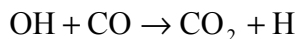
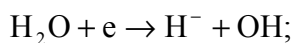
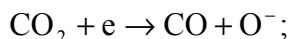


Рис. 3. Электрооптическая эффективность:

- + - смесь $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{H}_2\text{O}=1:9:0,25\%$;
- - смесь $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{H}_2\text{O}=1:7:0,1\%$;
- - смесь $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{H}_2\text{O}=1:6:0,1\%$;
- × - смесь $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}=1:5:2$

Снижение КПД объясняется тем, что при росте концентрации $\text{N}_2 \geq 70\%$ и повышении концентрации H_2O возрастает пороговая напряжённость электрического поля. Однако снижение КПД компенсируется увеличением электрической прочности смесей, содержащих H_2O как в импульсном, так и в импульсно-периодических режимах. Соотношение $\text{CO}_2:\text{N}_2$ имеет пологий максимум в диапазоне 1:(6÷9), при этом концентрация H_2O в смеси допускает вариации в диапазоне (0,1÷0,25) %. Отмечена повышенная стабильность параметров лазера в импульсно-

периодическом режиме, которая может быть обусловлена восстановлением CO_2 из CO в газовом разряде по реакциям [4]:



Результаты выполненных исследований показали, что дешёвые лазерные смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2+\text{H}_2\text{O}=1:(6\div 9)+0,1\div 0,25$ %, составленные из технических газов, могут успешно применяться в технологических ЭИ CO_2 лазерах.

Библиографический список

1. Douglas-Hamilton D.H., Feinberg R.M., Lowder R.S., J. Appl. Phys., 1975, vol.

46, No.8, p. 3566.

2. Данилычев В.А. Оптимизация режимов работы импульсных электроионизационных лазеров на CO_2 / В.А. Данилычев, И.Б. Ковш, В.А. Соболев // Труды ФИАН, 1980, Т.116. – С. 98.

3. Бабаев, И. К. Получение излучения с энергетической силой на уровне тераватт на стерадиан в импульсно-периодической электроионизационной CO_2 -системе задающий генератор – усилитель / И.К. Бабаев [и др.] // Квантовая электроника. – 1991.– Т. 18. – № 1. – С. 6.

4. K. Smith, R.M. Thomson, // Computer Modeling of Gas Lasers//, Plenum Press, New York, 1978.

А.Ю. Абаляев, В.М. Басуров, В.Ф. Гуськов

Владимирский государственный университет

ВЛИЯНИЕ НАНОКОМПОЗИЦИОННОЙ ПРИСАДКИ Mg/MoO_3 К ТОПЛИВУ НА РАБОЧИЙ ЦИКЛ ДИЗЕЛЯ

Представлены результаты исследования влияния нанокomпозиционной присадки Mg/MoO_3 к топливу на характер процесса тепловыделения и показатели рабочего цикла дизеля. Показано, что применение присадки позволяет улучшить мощностные и экологические показатели силового агрегата.

Совершенствование мощностных, экологических и экономических показателей дизелей невозможно без изменения условий протекания процессов смесеобразования и сгорания. Одним из перспективных способов такого воздействия является использование присадок, изменяющих физико-химические свойства топлива.

Развитие нанотехнологий позволило получать широкий спектр веществ, обладающих уникальными, заранее заданными свойствами, в том числе предназначенных для использования в качестве присадок к дизельному топливу. Одним из подобных веществ является разработанный в ИХФ РАН РФ им. Н.Н. Семенова нанокomпозит

Mg/MoO_3 .

Нанокomпозитная присадка к дизельному топливу представляет собой инертный при нормальных условиях порошок серого цвета, состоящий из частиц оксида молибдена MoO_3 диаметром 20 нм с включением наночастиц магния Mg. Состав нанокomпозита в массовых долях $g_{\text{Mg}} / g_{\text{MoO}_3} = 33,5 / 66,5$. Насыпная плотность равняется $2,99 \text{ г/см}^3$. При нагревании до температуры выше 180°C между компонентами нанокomпозита протекает экзотермическая реакция



Теплотворная способность нанокomпозита составляет 1170 ккал/кг .

Исследование влияния нанокomпозиционной присадки на рабочий цикл проводилось на дизеле воздушного охлаждения 4Ч10,5/12 производства ОАО "ВМТЗ" (г. Владимир).

При исследовании массовая доля нанокomпозиционной присадки в топливе С варьировалась от 0 до 4 %.

Анализ результатов индицирования рабочего процесса (табл. 1) показывает, что добавление в топливо 1 % нанокomпозиционной присадки приводит к уменьшению периода задержки воспламенения на 0,15 мс. При этом максимальное давление цикла p_z несколько снизилось, а максимальная скорость нарастания давления $(dp/d\phi)_{max}$ уменьшилась в 1,5 раза. Увеличение содержания присадки в топливе не привело к дальнейшему изменению периода задержки воспламенения, но привело к снижению p_z и $(dp/d\phi)_{max}$. В то же время повышение содержания присадки в топливе приводит к росту максимальной температуры цикла T_{max} и некоторому увеличению полноты индикаторной диаграммы. Также при использовании нанокomпозиционной присадки можно отметить рост относительного индикаторного КПД на 10 %.

Анализ результатов обработки индикаторных диаграмм на тепловыделение (рисунок) показывает, что при работе дизеля на чистом дизельном топливе наблюдается два максимума на кривой скорости относительного тепловыделения, первый из которых характерен для выгорания паров топлива, образовавшихся во время периода задержки воспламенения. Увеличение доли присадки в цикловой подаче топлива приводит к уменьшению первого пика. При этом максимальная скорость относительного тепловыделения $(dx/d\phi)_{max}$ с увеличением доли нанокomпозитной присадки в топливе остается постоянной.

Начиная с доли присадки 3% и более первый пик на кривых скорости относительного тепловыделения не наблюдается, что свидетельствует о повышении управляемости процесса сгорания. Количество теплоты, подведенной к рабочему телу с

присадкой $q_{ин}$, составляет от 2,10 до 9,03 Дж (табл. 2), при общем количестве подведенной теплоты 2024 Дж.

Таблица 1
Результаты обработки индикаторных диаграмм

C, %	p_z , МПа	T_{max} , К	τ_i , мс	$(dp/d\phi)_{max}$, МПа/°ПК В	$(dx/d\phi)_{max}$	Относительный индикаторный КПД
0	5,32	1530	1,50	0,440	0,090	1,000
1	5,14	1566	1,35	0,288	0,098	1,096
2	5,10	1576	1,35	0,275	0,095	1,099
3	5,10	1591	1,35	0,253	0,098	1,122
4	5,09	1603	1,35	0,245	0,099	1,100

Анализ процесса тепловыделения в период от начала сгорания модифицированного до момента самовоспламенения чистого дизельного топлива (см. табл. 2) показывает, что количество теплоты q_{ti} , выделяющееся в этот промежуток времени, остается практически неизменным независимо от количества присадки в топливе. Следовательно, нанокomпозиционная присадка, равномерно распределенная по объему распыленного топлива, при испарении капли попадает на ее поверхность, где нагревается до температуры начала реакции (1). В результате протекания реакции восстановления молибдена наблюдаются эффекты дробления капель топлива и осуществляется подвод дополнительного количества теплоты, инициирующей процесс сгорания паров дизельного топлива.

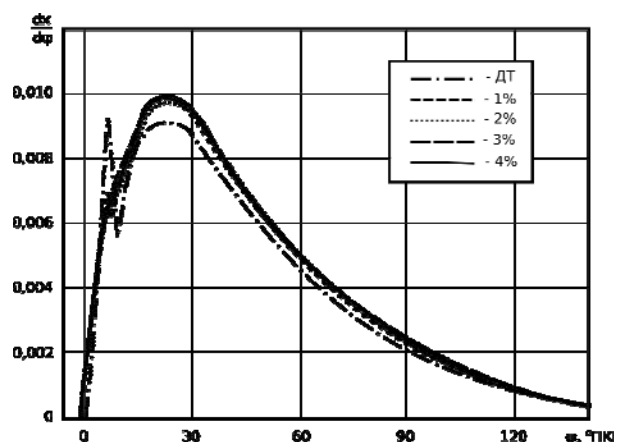


Таблица 2
Результаты обработки индикаторных диаграмм на тепловыделение

Таблица 2

Результаты обработки индикаторных диаграмм на тепловыделение

C, %	$q_{ин}$, Дж	$q_{тi}$, Дж
0	0,00	0,00
1	2,10	1,60
2	4,30	1,71
3	8,50	1,73
4	9,03	1,76

В целом, анализируя результаты экспериментальных исследований влияния наноконпозиционной присадки Mg/MoO₃ на рабочий цикл дизеля, можно сделать следующие выводы:

1) увеличивается управляемость процесса сгорания благодаря уменьшению доли паров топлива, образовавшихся за период задержки самовоспламенения;

2) наблюдается эффект повышения мелкости распыливания топлива без внесения конструктивных изменений в топливную аппаратуру дизеля;

3) индикаторный КПД увеличивается не менее чем на 10 %;

4) существенно уменьшается жесткость процесса сгорания;

5) уменьшается максимальное давление цикла при одновременном увеличении полноты индикаторной диаграммы.

В.В. Дорожков, Л.В. Фуров

Владимирский государственный университет

В.Н. Конешов

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СЕЙСМОСТАНЦИЯ «ВЛАДИМИР»
НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ ПОЛИГОНЕ ВЛГУ**

Представлены результаты создания на научном экспериментальном полигоне кафедры «Общая и прикладная физика» ВлГУ автоматизированной сейсмостанции «Владимир» в рамках проекта, направленного на построение высокоточного гравиметрического пункта 1-го класса. Отражены результаты сейсморегистраций и исследований техногенных сейсмошумов

С 2008 года на территории научного экспериментального полигона кафедры «Общая и прикладная физика» (ОиПФ) Владимирского государственного университета (ВлГУ) работают автоматические сейсмические станции различных типов, осуществляющие регистрацию сейсмических событий и микросейсмического шума.

Длительные непрерывные сейсморегистрации позволили позиционировать место сейсмоизмерений – территорию научного экспериментального полигона кафедры ОиПФ ВлГУ как сейсмическую станцию «Владимир», отличающуюся малым уровнем техногенных сейсмических шумов и техногенных воздействий [1].

Создание автоматизированной сейсмо-

станции «Владимир» явилось необходимым условием проекта, направленного на построение первого в России адаптированного в международную сеть гравиметрического пункта 1-го класса с низким уровнем сейсмических шумов по оценке неприливных изменений силы тяжести и сравнения конструкций баллистических гравиметров, расположенного в Центральном регионе Российской Федерации.

Актуальность создания гравиметрического пункта 1-го класса определена решениями правительственной гравитационной комиссии, в которых отмечается необходимость в высокоточных наблюдениях в целях создания моделей воздействий на геофизические процессы, изучения взаимосвязей геофизи-

ческих явлений.

В 2008 году Международное бюро мер и весов (BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES), находящееся во Франции, обратилось с предложением подобрать в России место расположения и выработать условия по размещению высокоточных баллистических гравиметрических приборов. В мае 2009 года ВРМ предложило свою поддержку проекту создания сейсмогравиметрической обсерватории на территории полигона Владимирского государственного университета.

Одним из центров экспериментальных исследований в Центральном регионе является научный экспериментальный полигон кафедры общей и прикладной физики ВлГУ, расположенный в 40 километрах от г. Владимира, являющийся "геофизическим заповедником" с низким уровнем техногенных помех и промышленных загрязнений. На полигоне кафедры длительное время проводятся исследования в области тепло- и электрофизических процессов, измерения вариаций электрических крайненизкочастотных полей в приземном слое атмосферы Земли, коррелирующих с рядом глобальных явлений. Действующий научный полигон с системами энергоснабжения и жизнеобеспечения, лабораториями и мастерскими с постоянной охраной позволяет круглогодично проводить работы и исследования. На полигоне расположен комплекс различных крупномасштабных установок, устройств, а также укрытия для аппаратуры и помещения для работы операторов.

На полигоне с 2008 года научной группой кафедры физики ВлГУ и сотрудниками Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта (ИФЗ РАН), в том числе «Эпицентральной лаборатории» ИФЗ РАН под руководством С.С. Арефьева, проводятся непрерывные сейсмические измерения и исследования с использованием автоматизированных сейсмостанций различных типов. Однако в течение трехлетнего периода набор используемой аппаратуры и

подходы к регистрации неоднократно менялись. По факту регистрация ведется в экспериментальном исследовательском режиме.

Были пройдены этапы экспериментальных сейсморегистраций в непрерывных режимах, направленные на совершенствование регистрационных характеристик комплексов, составляющих комплекты автоматических сейсмостанций – сейсмических датчиков, автоматических регистраторов, устройств архивирования и обработки информации, GPS-приемников навигационного позиционирования, блоков питания.

Первые измерения были проведены с использованием автоматической сейсмостанции «SEISAR-4-ST», разработанной в ИФЗ РАН. С помощью этой сейсмостанции в различных точках территории полигона были проведены измерения антропогенных и техногенных сейсмошумов.

Параллельно был запущен комплект типовой автоматической широкополосной трехкомпонентной сейсмостанции „UGRA“ с сейсмодатчиками GS-5, действующей в непрерывном режиме регистрации. В комплект сейсмостанции также входят GPS-приемник и стабилизированный блок питания. Измерения проводились в различных точках территории полигона.

Сейсмостанция „UGRA“ в дальнейшем использовалась как основная типовая станция. Исследования с применением этой станции велись в направлении подбора типов сейсмодатчиков, обеспечивающих оптимальные частотные и шумовые характеристики.

В месте оптимального, с точки зрения минимума сейсмопомех, расположения на территории экспериментального полигона было построено здание создаваемой сейсмогравиметрической обсерватории с тремя специальными (отвечающими требованиям обеспечения надежного функционирования геофизической аппаратуры для гравиметрического пункта 1-го класса) центрами-постаментами для размещения гравиметри-

ческой и сейсмической аппаратуры. С сентября 2009 года комплекты сейсмостанций располагаются на центрах-постаментях.

Для уточнения уровней помеховой сейсмообстановки на сейсмостанции «Владимир» проведены сравнительные экспериментальные регистрации микросейсмического шума с участием экспедиционной группы Геофизической службы РАН.

Сравнительный эксперимент проведен также с целью уточнения влияния переходных и частотных характеристик аппаратуры, составляющей комплект сейсмостанций: сейсмодатчики – АЦП – сейсморегистратор (автоматическая сейсмостанция).

На центрах-постаментях располагались и работали в непрерывном режиме четыре комплекта различной, в том числе импортной, сейсморегирующей аппаратуры.

В табл. 1 приведена комплектация различных сейсмостанций, использовавшихся в сравнительном эксперименте.

Таблица 1. Приборы, использовавшиеся при регистрации микросейсм

№	Код	Регистратор	Датчик	Примечание
1	GURU	UGRA	Guralp	–
2	GURp	Reftekh	Guralp	–
3	V5in	SEISAR ST –m	C5C	Экспериментальный. На постоянной регистрации
4	VLAK	UGRA	CM3-OC, C5C	На постоянной регистрации

Результаты проведенного эксперимента позволили оптимизировать комплектацию приборов, составляющих сейсмостанции, в зависимости от поставленных задач сейсморегираций (исследование спектра помех, регистрация сильных землетрясений Мира, регистрация близких сейсмических событий и т.д.).

Для оценки уровня сейсмических колебаний сначала проводятся специальные измерения, а также предварительная обработка

данных. Полученная информация далее анализируется различными методами. Оценка спектра энергии полезна для многочисленных приложений, включая выделение сигналов, скрытых в широкополосном волновом процессе.

Простейшим методом расчета спектральной плотности энергии считается метод периодограмм, относящийся к непараметрическим методам, т.е. методам, в которых спектральная плотность оценивается непосредственно по сигналу. Он реализуется как квадрат результата дискретного преобразования Фурье для выборки процесса (обычно осуществляемой на сетке с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ)). Однако недостатком этого метода является то, что периодограмма дает большие вариации исследуемой величины, причем они не уменьшаются при увеличении исследуемой выборки, т.е. при увеличении N в БПФ периодограмма не становится более гладкой. Уменьшить вариации результата можно путем разбиения исследуемой выборки сигнала на отдельные интервалы с последующим их усреднением, а также с помощью применения различных окон к разбиваемым интервалам. Эти операции реализуются в методах модифицированных периодограмм, например, в методе Велча.

Для расчета спектральной плотности энергии сейсморегираций применяется метод Велча со следующими входными параметрами. Весь сигнал разбивается на интервалы длиной 2048 точек с пересечением в 1024 точка, т.е. на 50 %. Каждый интервал сглаживается окном Ханнинга длиной 2048 точек. Преобразование Фурье вычисляется для этих интервалов. Предварительно сигнал дифференцируется. После этого из спектра удаляется характеристика прибора. Впервые такой подход к анализу микросейсмического шума был применен Петерсоном [2].

Поскольку в отличие от обычного спектрального анализа здесь результат не зависит от размеров выбранного участка записи, этот подход удобен для сравнения различ-

ных мест расположения сейсмореги­страторов между собой и даже с местами размещения всемирно известных сейсмо­станций.

Участок записи результатов сейсмо­изменений на коротком временном отрезке для одного из комплектов указанных в табл. 1 сейсмо­станций и вычисление спектров мощности микросейсмического шума пред­ставлены на рис. 1.

Сейсмическая станция «Владимир» в не­прерывном режиме регистрирует все без исключения достаточно сильные землетря­сения Мира. Но в целом задача регистра­ции далеких землетрясений перед станцией «Владимир» не ставилась. Такие данные ис­пользуются лишь для демонстрации регис­трационных возможностей и контроля рабо­тоспособности аппаратуры.

В табл. 2 приводится как пример элемент каталога зарегистрированных далеких зем­летрясений с их параметрами (датой; коор­динатами; глубиной очага; магнитудой мощности микросейсмического шума, рас­стоянием от очага до точки регистра­ции – сейсмо­станции «Владимир») и соответ­ствующим изображением.

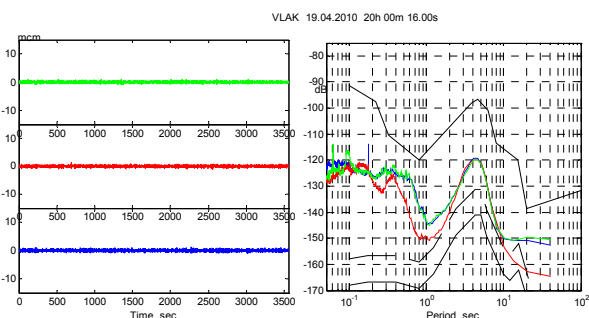


Рис. 1. Реализации и спектры

Таблица 2. Пример элемента каталога заре­гистрированных далеких землетрясений

№ п/п	Год Ме­сяц День	Коорди­наты	Глу­бина, км	Mw	Сейсмо­событие (рис.)	Рас­стояние, км
1	20 10. 02 07	23,49 123,61	21	6,3	рис.1	7424

На рис. 2 приведено трехкоординатное изображение землетрясения, параметры ко­

торого даны в табл. 2. Большая часть из мно­гих зарегистрированных далеких землетря­сений соответствует данным сайта геологи­ческой службы США (каталог NEIC).

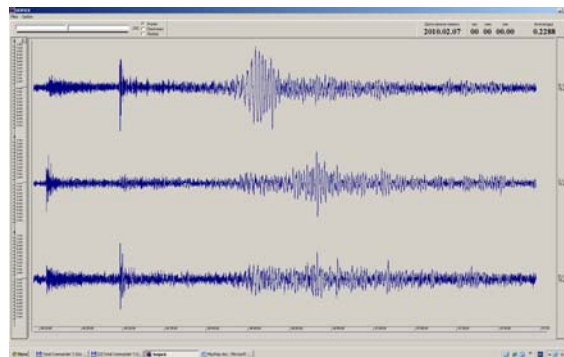


Рис. 2. Пример регистрации дальнего землетрясения (по табл.1)

Периодически сейсмическая станция «Владимир» регистрирует близкие (удале­ние около 100 км) сейсмические события. По всей вероятности, это взрывы. Посколь­ку магнитуда оценивается как M=2.0, можно предположить вес взрывчатого вещества около 500 кг в тротиловом эквиваленте (пример регистра­ции на рис. 3). Направление и дальность до мест расположения взрывов, а также то, что они происходят по рабочим дням и в дневные часы, подтвер­ждается реальным нахождением карьеров по промышленной добыче строительного кам­ня во Владимирской области.

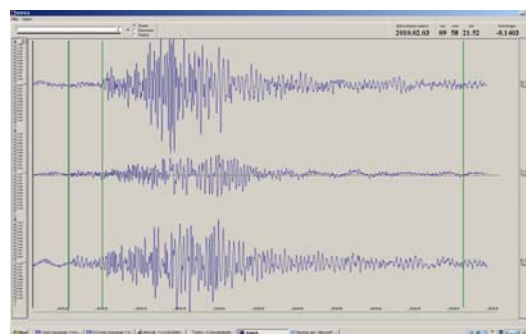


Рис. 3. Пример сейсморегистрации промышлен­ных взрывов

Периодически сейсмическая станция «Вла­димир» регистрирует на фоне малого техно­генного сейсмического шума локальные (S-P = 1-2 сек, M~1.0) сейсмические события

(микротрески). Природа этих микротресков не выяснена. Требуется продолжение наблюдений и исследований. Пример записи одного из видов локальных микротресков приведен на рис. 4.

По результатам трехлетних сейсмологических наблюдений на научном экспериментальном полигоне можно сделать определенные выводы, подкрепленные фактическим материалом по следующим направлениям.

1. Сейсмостанция «Владимир» может осуществлять регистрацию достаточно сильных телеметрических сейсмических событий практически из любой части мира.

2. Периодически сейсмостанция «Владимир» регистрирует близкие сейсмические события техногенного характера, предположительно взрывы ~500-килограммового толового эквивалента.

3. Периодически сейсмостанция «Владимир» регистрирует локальные сейсмические события (микротрески) неустановленной природы.

4. Регистрация микросейсм осуществляется практически непрерывно.

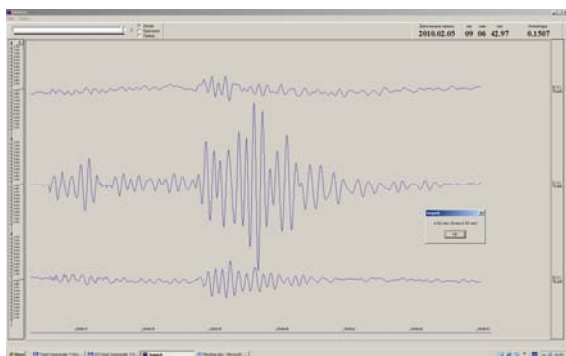


Рис. 4. Один из примеров регистрации микротресков

Как было отмечено и подтверждается постоянными сейсмонаблюдениями в обзорном режиме с использованием современных автоматических сейсмостанций, уровни техногенных сейсмических шумов на сейсмостанции «Владимир» являются минимальными по отношению к уровням техногенных шумов на сейсмических стан-

циях России.

Малый уровень техногенных сейсмических шумов и техногенных воздействий в точке расположения создаваемой сейсмогравиметрической обсерватории обуславливает и обосновывает условия для создания в этой точке гравиметрического пункта 1-го класса государственной гравиметрической сети.

Научный полигон обладает оборудованием для передачи в режиме реального времени экспериментальных данных через систему Интернет и для дистанционного управления (например, из лаборатории электрофизических измерений кафедры ОиПФ в ВлГУ) работой автоматизированной аппаратуры, находящейся на полигоне. При этом используется оборудование дальнего доступа на основе спутникового приемника и аппаратуры SKYLINK [3]. Результаты измерений могут использоваться в том числе в учебно-научных целях и научно-исследовательской работе студентов старших курсов.

Библиографический список

1. Дорожков, В. В. О создании автоматизированной сейсмографической станции «Владимир» с системой дальнего доступа / В. В. Дорожков [и др.] // Перспективные технологии в средствах передачи информации: материалы 8-й междунар. науч.-техн. конф. – Владимир, 2009. – С. 93-95.

2. Peterson J. Observations and modeling of background seismic noise. Open File Report, U.S. Geological Survey, Albuquerque, NM, 1993. – С. 93-322.

3. Дорожков, В. В. Использование информационно-измерительного комплекса с системой дальнего доступа в учебно-научных целях и в научно-исследовательской работе студентов / В.В. Дорожков // Тез. докл. науч.-метод. школы-семинара «Физика в системе инженерного образования стран ЕврАзЭС.» – М., 2008. – С. 139-141.

И.Н. Кузьмин, И.М. Мамаев, К.В. Рябов, Р.Ю. Тутубалин, В.Н. Филимонов

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРИВОДЫ ДЛЯ НАНОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Рассмотрены электромеханические приводы линейного перемещения с высокой разрешающей способностью на базе планетарных роликвинтовых передач. Приведены расчеты основных показателей технического уровня спроектированных приводов различного назначения: статической и динамической грузоподъемности, КПД прямого и обратного хода.

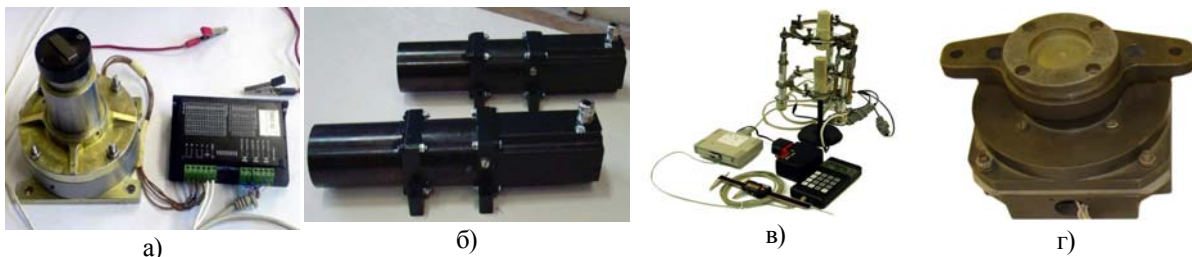
Планетарные роликвинтовые передачи (ПРВП) обеспечивают преобразование вращательного движения в поступательное и находят широкое применение в электромеханических приводах линейного перемещения.

На кафедре теоретической и прикладной механики Владимирского государственного университета в настоящее время ведутся разработки и исследования электромеханических приводов панелей отражающей поверхности радиотелескопа, станка электрохимической обработки высокотвердых материалов, автономного ортопедического аппарата автоматизированного остеосинтеза, тормоза автомобиля.

Электромеханический привод (актуатор или электродомкрат) для регулировки положения панелей отражающей поверхности главного зеркала радиотелескопа дальней космической связи спроектирован и

Он представляет собой комплектный мехатронный модуль на базе ПРВП специального шагового электродвигателя с полым ротором ОАО «Фирма Микмар» (г. С.-Петербург) и микропроцессорной системы управления (рисунок а). По сравнению с актуатором итальянской фирмы «Sardinia radio telescope», выполненным на базе шариквинтовой передачи и червячного редуктора, наш актуатор при той же грузоподъемности имеет меньшие габариты, вдвое меньшую массу и втрое меньшую погрешность позиционирования выходного штока.

Применение обратной связи по положению и высокоточного датчика линейного перемещения МТ2571 фирмы Heidenhain позволило получить перемещение выходного штока актуатора с разрешающей способностью 50 нм.



Виды разработанных электромеханических приводов: а – электромеханический привод панели отражающей поверхности радиотелескопа; б – электромеханический привод станка электрохимической обработки высокотвердых материалов; в – электромеханический привод автономного ортопедического аппарата автоматизированного остеосинтеза; г – электромеханический привод тормоза автомобиля

изготовлен по заказу ФИАН им. П.Н. Лебедева в рамках межправительственного российско-узбекского соглашения (рисунок а).

Очевидно, что мехатронные модули с та-

кой высокой разрешающей способностью являются перспективными для применения в нанотехнологическом оборудовании, например, в оборудовании для изготовления

печатных плат, подвижках для предварительного перемещения иглы туннельных микроскопов, двухкоординатных сканирующих столиках для медицинских и биологических исследований, наземных и орбитальных телескопах, установках для выращивания монокристаллов, станках с адаптивным управлением для обработки деталей с нанометровой точностью и т.д.

Электромеханический привод на базе ПРВП и шагового электродвигателя SIEMENS SIMOSTEP спроектирован и изготовлен по заказу АО СП «Завод ТОПАЗ» (Молдова), входящего в группу предприятий НПО «САЛЮТ» (Москва) (рисунок б). В случае применения в приводе обратной связи по положению достигается разрешающая способность 500 нм. В течение 2009 - 2010 гг. нами испытаны и поставлены заказчику 12 таких приводов для двухкоординатного станка ЭХС-5000, предназначенного для обработки высокотвердых изделий сложной формы, в частности лопаток турбин, с точностью до 1-2 мкм при высоком быстродействии и номинальном усилии на выходном штоке 12000 Н.

Сравнительный анализ разработанного привода с альтернативным линейным электродвигателем фирмы Siemens показал, что последний вследствие излишнего запаса по скорости имеет в несколько раз большую массу и мощность при одинаковой нагрузке.

В автономном ортопедическом аппарате автоматизированного остеосинтеза, созданного взамен известного ортопедического аппарата с ручным приводом проф. Г.А. Илизарова, три независимых электромеханических привода обеспечивают микроперемещения и осевые усилия в соответствии с естественным процессом регенерации костной ткани (рисунок в). Это способствует более быстрому заживлению травмированных кровеносных сосудов и нервных тканей, сокращает сроки лечения и обеспечивает возможность автоматизированного лечения вне клиники. Автоматизированный аппарат успешно прошел экспертизу в Институте медицинской техники (г. Москва) и сертифи-

кационные клинические испытания в Республиканском клиническом детском ортопедоневрологическом реабилитационном центре (РКДОНЦ, пос. Пиганово Владимирской обл.).

Экспериментальный образец электромеханического привода тормоза (рисунок з) разработанный для перспективного автомобиля на топливных элементах ОАО «АвтоВАЗ», превышает по быстродействию известные гидравлические вдвое и электрогидравлические на 10 % приводы. Вместе с тем, по данным зарубежных экспертов, уменьшение тормозного пути автомобиля на 20 % снижает при авариях число смертельных случаев и тяжелых травм на 15 %.

Технический уровень разработанных электромеханических приводов во многом определяется техническим уровнем входящих в их состав ПРВП. Ниже определены основные показатели технического уровня спроектированных ПРВП: статической и динамической грузоподъемности, КПД прямого и обратного хода.

Методика расчета статической и динамической грузоподъемности ПРВП сведена к методике, положенной в основу расчета статической и динамической грузоподъемности многорядных упорных подшипников качения, так как при круговой резьбе на ролике и линейчатой на винте и гайке начальные контакты резьб осуществляются в точках. Расчет на прочность по статической грузоподъемности ведется при малых скоростях перемещения звеньев ПРВП (как правило, частота вращения входного звена не должна превышать 10 об/мин). Необходимо отметить, что в ряде случаев в соответствии с техническим заданием передача должна обеспечивать самоторможение, т.е. КПД не должен превышать 0,5.

Статическая грузоподъемность передачи C_0 по аналогии со статической грузоподъемностью подшипников принимается равной осевой нагрузке, которая вызывает остаточную деформацию в 0,0001 расчетного диа-

метра тела качения у наиболее нагруженного тела качения и в месте наиболее слабого контакта тела качения с дорожкой качения винта или гайки.

Полагая, что при максимально допустимой нагрузке в резьбовом сопряжении пятно контакта выходит за кромки резьбы, статическую грузоподъемность рассчитываем по известным зависимостям для линейного контакта [1].

Статическая грузоподъемность резьбовых сопряжений ролика с винтом:

$$C_{012} = C_{01л} n_p i_{12} k_{p12} \cos \alpha.$$

Статическая грузоподъемность резьбовых сопряжений ролика с гайкой

$$C_{023} = C_{03л} n_p i_{23} k_{p23} \cos \alpha,$$

где $C_{01л}$, $C_{03л}$ – статическая грузоподъемность линейного контакта в сопряжении винт - ролик и ролик - гайка соответственно, Н; n_p – число роликов; i_{12} , i_{23} – числа точек контактов в резьбовых сопряжениях ролика с винтом и ролика с гайкой соответственно; k_{p12} , k_{p23} – коэффициенты неравномерности распределения нагрузки по контактам, зависящие от точности изготовления резьбы, отношения длины ролика к его диаметру, величины нагрузки и величины предварительного натяга; α – половина угла профиля резьбы в нормальном сечении.

Статическая грузоподъемность передачи равна $C_0 = \min(C_{012}, C_{023})$, при этом внешняя осевая нагрузка F не должна превышать статическую грузоподъемность.

Динамическая грузоподъемность передачи – это величина осевой нагрузки, которую выдерживает передача с вероятностью 90 % в течение 1 млн. оборотов винта или гайки до появления признаков усталости материала. Полагая, что в резьбовом сопряжении при рабочей нагрузке пятно контакта не выходит на кромку резьбы, то динамическую грузоподъемность можно рассчитывать по известным зависимостям для точечного контакта [1].

Выражение динамической грузоподъем-

ности передачи с длинными резьбовыми роликами при приведенном диаметре тела качения $D_w \leq 25,4$ мм:

$$C = f_c (i_{12} k_{p12} \sin \alpha)^{0.7} K_T K_\alpha n_p^{2/3} D_w^{1.8} \operatorname{ctg} \alpha,$$

где f_c – коэффициент, зависящий от геометрии резьб, точности их изготовления и мате-

риала; $K_T = \left[\frac{\text{HRC}}{58} \right]^{3.6} = 1$; по аналогии с

методикой расчета подшипников влияние величины угла контакта на работоспособность передачи корректируется коэффициентом $K_\alpha = 1 - 0,33 \cos \alpha$; D_w – расчётный диаметр тела качения, мм.

Полученный результат умножаем на 0,5 – коэффициент уменьшения динамической грузоподъемности из-за скольжения ходовой гайки.

Долговечность передачи (млн. об.):

$$L = \left(\frac{C}{F_{\text{экв}}} \right)^3, \text{ где } F_{\text{экв}} \text{ – эквивалентная на-}$$

грузка, Н.

Коэффициент полезного действия прямого хода планетарной роликовинтовой передачи:

$$\eta_{г.д.} \approx \frac{1}{1 + \frac{A_{\text{од.н}}}{A_{г}} + \frac{A_{\text{од.э}}}{A_{г}} + \frac{A_{\text{од.л}}}{A_{г}}}.$$

КПД обратного хода:

$$\eta_{б.х.} \approx 1 - \frac{A_{\text{тр.с}}}{A_{п}} - \frac{A_{\text{тр.к}}}{A_{п}} - \frac{A_{\text{тр.о}}}{A_{п}},$$

где $A_{п}$ – полезная работа за оборот винта; $A_{\text{тр.с}}$ – работа сил трения скольжения при внеполюсном сопряжении резьб за оборот винта при половине угла профиля $\alpha = \pi/4$; $A_{\text{тр.к}}$ – потери на трение качения сопряженных резьб в передаче; $A_{\text{тр.о}}$ – потери на трение качения в опорах передачи.

В передаче с опорной гайкой $A_{\text{тр.к}}/A_{п} = A_{\text{тр.о}}/A_{п}$.

Результаты расчетов приведены в таблице.

Наименование	Электро-механический привод панели отражающей поверхности радиотелескопа	Электро-механический привод станка электро-химической обработки высоко-твердых материалов	Электро-механический привод автономного ортопедического аппарата автоматизированного остеосинтеза	Электро-механический привод тормоза автомобиля
Динамическая грузоподъемность, Н	18340	106550	6540	31505
Статическая грузоподъемность, Н	45740	Не определялась	9740	Не определялась
Долговечность, млн. об	3570	500	161,7	3,91
КПД прямого хода	0,43	0,72	0,27	0,72
КПД обратного хода	0,45	0,58	0,38	0,58

Полученные расчетные значения КПД планетарных роликвинтовых передач под-

тверждены экспериментально [2]. Все спроектированные электро-механические приводы различного назначения основаны на ПРВП, что подтверждает универсальные свойства ПРВП как наукоемких компонентов общемашиностроительного применения. Технический уровень выполненных разработок превышает технический уровень известных отечественных и зарубежных аналогов.

Библиографический список

1. Козырев, В. В. Конструкции роликвинтовых передач и методика их проектирования: учеб. пособие / В.В. Козырев. – Владимир; ВлГУ, 2004. – 102 с. ISBN 5-89368-512-1.

2. Козырев, В.В. Экспериментальные исследования роликвинтовой передачи РВПЗК 52,8x1x60 в составе шагового электро-механического привода для станка электро-химической обработки лопаток турбин авиационных двигателей / В.В. Козырев [и др.] // Труды ГОСНИТИ. – М.: ГОСНИТИ, 2010. – Т. 106. С. 165-168.

Т.С. Шуткина

Владимирский государственный университет

ЕДИНСТВЕННОСТЬ ЦИКЛА С ДИСКОНТИРОВАНИЕМ ПО ДОХОДУ И ПРИЛАГАЕМЫМ УСИЛИЯМ, ОПТИМАЛЬНОГО ПО СРЕДНЕЙ ВРЕМЕННОЙ ВЫГОДЕ

В работе для циклических процессов, моделируемых периодическими движениями непрерывной управляемой системы на окружности, доказана теорема единственности цикла, доставляющего максимальную среднюю временную выгоду за один период при наличии дисконтирования по доходу и прилагаемым усилиям при условии, что минимальная и максимальная скорости движения системы совпадают лишь в отдельных точках, а плотность выгоды является дифференцируемой функцией с конечным числом критических точек. Эта теорема - аналог теоремы В.И. Арнольда о единственности такого цикла в случае, когда дисконтирование отсутствует.

1. Введение

Циклический процесс моделируется управляемой системой на окружности, задаваемой полем скоростей v , гладко завися-

щим от точки x окружности и управляющего параметра. Предполагается, что этот параметр пробегает гладкое компактное многообразие (или объединение таковых) и

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке грантов АВЦП РНПВШ № 2.1.1/5568 и НШ-8462.2010.1

принимает не менее двух различных значений, а все допустимые скорости положительные, то есть $v > 0$. Циклом с периодом $T > 0$ называют периодическое допустимое движение, повторяющееся после одного оборота по окружности. Время, затрачиваемое циклом за один оборот, называется его периодом. При наличии непрерывной *плотности выгоды* f на окружности возникает задача выбора циклического процесса с максимальной средней временной выгодой за один оборот

$$\frac{1}{T} \int_0^T f(x(t)) dt \rightarrow \max.$$

В.И. Арнольд показал, что в этом случае оптимальная стратегия существует и устроена просто - соответствующее ей движение использует максимальные и минимальные допустимые скорости на участках, где плотность выгоды меньше или больше максимальной средней временной выгоды за цикл [1-4]. В частности, когда плотность выгоды дифференцируема и имеет лишь конечное число критических точек, то движение вдоль оптимального цикла и сам цикл определены однозначно.

В этой работе получен аналогичный результат для циклов при наличии положительного дисконта по выгоде $\alpha > 0$, и прилагаемым усилиям β - доказана единственность оптимального цикла в задаче

$$\int_0^T e^{-\alpha t} f(x(t)) dt / \int_0^T e^{-\beta t} dt \rightarrow \max \quad (1)$$

при разумных ограничениях на управляемую систему и плотность выгоды. Если показатель дисконтирования α снижает ценность позднее получаемой выгоды, то показатель β характеризует изменение способности управляемого объекта извлекать выгоду при продвижении по циклу.

2. Существование оптимальной стратегии

Следуя В.И. Арнольду [1], для допустимого движения x определим плотность $\rho, \rho(x(t)) = 1/\dot{x}(t)$. В силу абсолютной не-

прерывности допустимого движения эта плотность определена почти всюду, а в остальных точках за её значение можно выбрать любое возможное. Таким образом, почти всюду мы имеем $dx(t) = \dot{x}(t)dt$ или $dt = \rho(x(t))dx(t)$. С этой плотностью задача (1) может быть переписана в виде

$$A_p(f) := \beta \alpha^{-1} \int_0^{2\pi} f(x) de^{-\alpha\phi(x)} / \int_0^{2\pi} de^{-\beta\phi(x)} \rightarrow \max, \quad (2)$$

где $\phi(x) = \int_0^x \rho(z) dz$, а интегралы в (2) являются интегралами Римана - Стильтьеса. Теперь для решения задачи нужно найти измеримую плотность ρ (или соответствующую функцию ϕ), доставляющую максимум функционала в (2) и удовлетворяющую ограничениям

$$r_1 \leq \rho \leq r_2. \quad (3)$$

Здесь r_1 и r_2 – положительные функции, обратные значениям максимума и минимума допустимой скорости соответственно, а 0 и 2π – это начальная и конечная точки цикла. Измеримую плотность, удовлетворяющую ограничениям (3) будем называть допустимой.

Теорема существования и условие экстремума

Для непрерывных плотности выгоды f и положительных функций ограничения $r_1, r_2, r_1 \leq r_2$ существует допустимая плотность, доставляющая точную верхнюю грань значений функционала в (2) по всем допустимым плотностям. Эта теорема доказана в [7], где также получено следующее необходимое условие экстремума.

Если для непрерывных плотности выгоды f и положительных функций ограничения $r_1, r_2, r_1 \leq r_2$, допустимая плотность ρ доставляет максимум A функционала в (2), то в

любой точке x , где эта плотность производна от своего интеграла и $r_1(x) \neq r_2(x)$, значение $S(x)$ функции

$$e^{-\alpha\varphi(x)} f(x) + \alpha(P(x) - P(2\pi)) - e^{-\beta\varphi(2\pi)} A, \quad (4)$$

где $P(s) = \int_0^s e^{-\alpha\varphi(y)} f(y) \rho(y) dy$ является не-

положительным, неотрицательным либо равным нулю, если $\rho(x)$ принимает значение $r_1(x)$ или $r_2(x)$, либо принадлежит интервалу $(r_1(x), r_2(x))$ соответственно. Функция S играет роль функции переключения. Нетрудно видеть, что функцию переключения можно переписать в виде

$$S(x) = \int_0^x e^{-\alpha\varphi(y)} f'(y) dy + f(0) - \alpha P - e^{-\beta\varphi(2\pi)} A. \quad (5)$$

Легко заметить, что при $\alpha = 0, \beta = 0$ функция переключения та же, что и в случае без дискаунта [1 - 6]. В новой форме функции переключения величина $-\alpha P - e^{-\beta\varphi(2\pi)} A$ неизвестна, но на оптимальном цикле она равна некоторой константе. После выбора значения c этой константы функция переключения примет вид

$$\int_0^x e^{-\alpha\varphi(y)} f'(y) dy + f(0) + c. \quad (6)$$

Эта функция однозначно определяет допустимое движение с вычислением точек переключения по ходу движения как нулей этой функции, если у этой функции конечное число критических точек. В этой форме функция переключения дифференцируема, если плотность выгоды дифференцируема, и имеет производную $S'(x) = e^{-\alpha\varphi(x)} f'(x)$, $x \in [0, 2\pi)$. В этом случае число критических точек у функции переключения то же, что и плотности выгоды, а значит, число точек переключения может быть больше числа критических точек плотности выгоды не более чем на единицу. Цикл, доставляемый таким допустимым движением с точками переключения в нулях функции (6), будем назы-

вать циклом уровня c , а само c - уровнем этого цикла.

3. Теорема единственности

Для дифференцируемой плотности выгоды f с конечным числом критических точек и положительных функций ограничения $r_1, r_2, r_1 \leq r_2$, совпадающих лишь в отдельных точках, цикл, доставляющий максимальную среднюю временную выгоду, определен однозначно, если эта плотность неотрицательна.

3.1. Монотонность периода

При конечности числа критических точек плотности выгоды любой уровень функции переключения состоит из конечного числа точек, в частности, таковым является и ее нулевой уровень, доставляющий точки переключения между максимальной и минимальной допустимыми скоростями движения.

Рассмотрим теперь минимальное и максимальное значения m, M функции переключения в нуле такие, что при $c < m$ и $c > M$ движение по циклу уровня c происходит с допустимой минимальной и максимальной плотностями соответственно. Таким образом, цикл с наибольшей средней временной выгодой является циклом некоторого уровня $c \in [m, M]$.

Для дифференцируемой плотности выгоды с конечным числом критических и непрерывных функций ограничения r_1 и r_2 , $r_1 \leq r_2$, совпадающих лишь в отдельных точках, период цикла уровня c - непрерывная возрастающая функция на отрезке $[m, M]$, имеющая вне значений уровня, для которых функция переключения имеет критические точки или концевые точки цикла на нулевом уровне, производную

$$T'(c) = \sum_{\{x_i\}} \frac{(r_2(x_i) - r_1(x_i)) \cdot e^{-\beta\varphi(2\pi)}}{e^{-\alpha\varphi(x_i)} |f'(x_i)|},$$

где суммирование идет по точкам переключения.

3.2. Дифференцируемость усредненной выгоды

Обозначим через τ_m и τ_M минимальный и максимальный периоды циклов уровня. В условиях, предложенных в п. 3.1, на отрезке $[\tau_m, \tau_M]$ определена и непрерывна обратная функция $c: T \mapsto c(T)$, к функции периода цикла уровня $T: c \mapsto T(c)$. В этом случае среднюю временную выгоду $A = A(c), c \in [m, M]$ вдоль цикла уровня мы можем рассматривать как функцию периода этого цикла, то есть $A = A(c(T)), T \in [\tau_m, \tau_M]$.

Если числа критических точек дифференцируемой плотности выгоды и точек совпадений значений непрерывных функций ограничения r_1 и r_2 , $r_1 \leq r_2$, конечны, то средняя временная выгода как функция периода цикла уровня является дифференцируемой на отрезке $[\tau_m, \tau_M]$ с производной

$$A'_T(c(T)) = -\frac{c(T) + \sigma P(c(T)) + e^{-\beta \varphi(2\pi)} A(c(T))}{T}.$$

Докажем теперь теорему единственности. В силу дифференцируемости средней временной выгоды по периоду её максимум достигается или на концах отрезка $[\tau_m, \tau_M]$, или в нуле $\tau \in (\tau_m, \tau_M)$ производной этой функции. В последнем случае имеем $c(\tau) + \sigma P(c(\tau)) + A(c(\tau)) = 0$ и $-c(\tau) - \sigma P(c(\tau)) = A(c(\tau))$.

Вычисляя вторую производную выгоды A по периоду цикла уровня, находим:

$$A''_T(c(\tau)) = -\frac{c_T(\tau) + \sigma \cdot e^{-\beta \varphi(2\pi)} A(c(\tau))}{T},$$

если в точке τ эта производная определена, а первая обращается в ноль, что нетрудно видеть. Первое слагаемое в числителе почти всюду положительно, а второе положительно в силу неотрицательности плотности выгоды и конечности числа её критических точек.

Следовательно, вторая производная A''_T почти всюду отрицательна вблизи точки τ ,

где первая производная обращается в ноль. Отсюда и непрерывности первой производной получаем, что вблизи любой критической точки средней временной выгоды её первая производная убывает. Следовательно, у этой выгоды не больше одного максимального значения на отрезке $[\tau_m, \tau_M]$. Таким образом, в условиях теоремы цикл уровня с максимальной средней временной выгодой определен однозначно.

Библиографический список

1. Арнольд, В. И. Оптимизация в среднем и фазовые переходы в управляемых динамических системах / В.И. Арнольд // Функциональный анализ и его приложение. 2002, Т 36. – С. 1 – 11.
2. Давыдов, А. А. Особенности типичного дохода в модели Арнольда циклических процессов / А.А. Давыдов // Тр. МИАН. № 250. 2005. – С. 79–94.
3. Давыдов А. А. Типичные фазовые переходы и особенности выгоды в модели Арнольда / А.А. Давыдов, Мена Матош Е. // Математический сборник. Т 198. – № 1.
4. Davydov A. A., Mena-Matos H. Singularity theory approach to time averaged optimization // Singularities in geometry and topology, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2007, 598-628.
5. Давыдов, А. А. Оптимизация циклического процесса с дисконтированием по его средней временной выгоде / А.А. Давыдов, Т.С. Шуткина // УМН, Т. 64. № 1, 2009. – С. 143–144.
6. Davydov A., Shutkina T. Time averaged optimization of cyclic processes with discount. Nonlinear Analysis and optimization problems. Proceedings from the International conference organized by Montenegro Academy of Sciences and arts. 13, pp.93-100, 2009.
7. Давыдов, А. А. Оптимизация циклических процессов с дисконтированием по усилению и выгоде / А.А. Давыдов, Т. С. Шуткина // Нелинейная динамика. – 2010. – Т. 6. – №1. – С. 151–158.

**О СКОРОСТИ СХОДИМОСТИ ПРИ АППРОКСИМАЦИИ МНОГОГРАННИКАМИ
ВЫПУКЛОЙ ПОВЕРХНОСТИ
С ЗАДАННОЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ КРИВИЗНОЙ**

Рассматривается задача, связанная с восстановлением замкнутой выпуклой поверхности в E^3 по её интегральной кривизне. Получена оценка скорости сходимости специальной последовательности многогранников, приближающих поверхность

1. Постановка задачи

Предположим, что замкнутая выпуклая поверхность P в евклидовом пространстве E^3 ограничивает область, содержащую начало координат - точку O . Напомним, что интегральной кривизной $\omega(U)$ борелевского множества $U \subset P$ называется площадь (лебегова мера) его образа при сферическом отображении.

Пусть $\mu(H)$ - неотрицательная вполне аддитивная функция, заданная на кольце борелевских множеств $\{H\}$ на единичной сфере $S = \{x \in E^3 : \|x\| = 1\}$ и $\psi: S \rightarrow P$ - центральная проекция из точки O со сферы на поверхность. Говорят, что P - поверхность с заданной интегральной кривизной $\mu(H)$, если для любого борелевского множества $H \subset S$ выполняется равенство

$$\omega(\psi(H)) = \mu(H)$$

Теорема существования в E^3 замкнутой выпуклой поверхности с заданной интегральной кривизной при некоторых условиях, налагаемых на функцию $\mu(H)$, доказана в [1] путем последовательного приближения многогранниками. При этом, как доказано в [1], поверхность определена однозначно с точностью до гомотетии.

В дальнейшем условия теоремы существования (см. [1]) предполагаются выполненными. Кроме того, полагаем, что функция μ задана интегралом

$$\mu(H) = \int_H g(x) dx, \quad (1)$$

где g - заданная функция точек сферы S , $g \in C(S)$, $g > 0$, а dx - элемент площади на S .

Мы рассматриваем специальную последовательность многогранников, аппроксимирующих поверхность. Для этого используем триангуляцию сферы $S = \bigcup_{\alpha} T_{\alpha}$, где T_{α} - равные друг другу равносторонние сферические треугольники. Для лучей l_{α} , исходящих из точки O в направлении центров треугольников T_{α} , и для чисел $\mu_{\alpha} = \mu(T_{\alpha})$ существует единственный с точностью до гомотетии выпуклый многогранник P_1 с вершинами на данных лучах и соответствующими кривизнами μ_{α} этих вершин (см. [1]). Далее, проводя геодезические на сфере S через середины сторон треугольников T_{α} (для каждого α), получим следующее разбиение сферы, являющееся подразбиением предыдущего. Аналогично описанному выше строим многогранник P_2 , отвечающий новому разбиению, и так далее. Обозначим $\{P_n\}$ - класс гомотетичных многогранников, полученных на n -м шаге этого процесса.

2. Оценка точности аппроксимации

Пусть $r(.,.)$ - расстояние в E^3 . Для построенной таким образом последовательности многогранников получена следующая оценка.

Теорема. Пусть $P \subset E^3$ - замкнутая выпуклая поверхность, звёздная относительно начала координат - точки O , и её интегральная

кривизна определена согласно (1). Тогда существует последовательность многогранников $P_1^*, P_2^*, \dots, P_n^*, \dots$, где $P_n^* \in \{P_n\}$, такая, что для произвольной точки $M \in P$ и соответствующей ей точки $M_n = OM \cap P_n^*$ выполняется неравенство $r(M, M_n) \leq \frac{C}{2^{\beta n}}$, если n достаточно велико.

Положительная константа C определяется функцией $g(x)$, диаметром поверхности P и диаметром d начальной триангуляции, то есть $C = C(g, \text{diam } P, d)$; $\beta > 1/48$ - абсолютная постоянная.

О доказательстве теоремы. Поскольку поверхности P и P_n , $n \in N$, являются двумерными многообразиями ограниченной кривизны (МОК) в смысле А.Д. Александрова, для доказательства теоремы использованы методы, развитые в теории МОК. В частности, если многообразие неотрицательной кривизны компактно и любая его точка M имеет кривизну $\omega(M) < \pi/4$, то, согласно [2], многообразие допускает конечное покрытие выпуклыми многоугольниками R_α , на каждом из которых можно ввести координаты $(u, v) \in Q$, $Q = \{(u, v) \in R^2 : u \geq 0, v \geq 0\}$ и задать в них метрику чебышевским линейным элементом

$$ds^2 = du^2 + 2 \cos \tau(u, v) du dv + dv^2. \quad (2)$$

Для построения такого атласа на поверхности P возьмём на триангулированной сфере S открытые выпуклые многоугольники \tilde{R}_α , подчиненные условию

$$\int_{\tilde{R}_\alpha} g(x) dx \leq \Omega_0 < \pi/2. \quad (3)$$

Последующие рассуждения, справедливые для каждого из многоугольников \tilde{R}_α , проведём только для одного из них; обозначим его \tilde{R} , для простоты опуская индекс. Многоугольник $R = \psi(\tilde{R}) \subset P$ с координатным гомеоморфизмом $\varphi : R \rightarrow \varphi(R) = D \subset Q$, построенным в [2], рассматриваем в качестве карты (R, φ) на поверхности. Тогда внутрен-

няя метрика ρ на поверхности P задаётся формулой (2),

$$\text{где } \tau(u, v) = \pi/2 - \omega[\varphi^{-1}(D_{uv})],$$

$$D_{uv} = \{(u', v') \in Q : 0 \leq u' < u, 0 \leq v' < v\}.$$

Пусть P_n^* - многогранник из класса $\{P_n\}$, $\psi_n : S \rightarrow P_n^*$ - центральное проектирование из точки O , и $R_n = \psi_n(\tilde{R}) \subset P_n^*$. Считаем n достаточно большим, таким, что все вершины P_n^* имеют кривизну меньше, чем $\pi/4$. Более того предположим, что для каждого многогранника из последовательности $\{P_n^*\}$ существует гомеоморфизм $\varphi_n : R_n \rightarrow \varphi_n(R_n) = D_n \subset Q$ такой, что внутренняя метрика ρ_n многогранника P_n^* на множестве $R_n \subset P_n^*$ задаётся линейным элементом

$$ds_n^2 = du^2 + 2 \cos \tau_n(u, v) du dv + dv^2,$$

$$\text{где } \tau_n(u, v) = \pi/2 - \omega[\varphi_n^{-1}(D_{uv})].$$

По построению чебышевских координат (см. [2]) гомеоморфизм φ есть предельное (при $n \rightarrow \infty$) отображение, индуцированное последовательностью гомеоморфизмов $\varphi_n \circ \psi_n \circ \psi^{-1}$.

Таким образом, (D_n, ds_n) изометрично (R_n, ρ_n) , подобно тому как (D, ds) изометрично (R, ρ) . Из условия (3) следует равномерная ограниченность отношений

$$a(\Omega_0) \leq \frac{ds^2}{du^2 + dv^2} \leq b(\Omega_0),$$

$$a(\Omega_0) \leq \frac{ds_n^2}{du^2 + dv^2} \leq b(\Omega_0). \quad (4)$$

Неравенства (4) позволяют доказать следующее утверждение.

Лемма 1. Пусть $\rho(A, B)$, $\rho_n(A, B)$ - расстояния соответственно в метриках ds и ds_n между точками $A, B \in D \cap D_n$.

Тогда

$$|\rho(A, B) - \rho_n(A, B)| \leq C_1,$$

$$\sup_{(u, v) \in D \cap D_n} \sqrt{|\omega[\varphi^{-1}(D_{uv})] - \omega[\varphi_n^{-1}(D_{uv})]|},$$

где $C_1 = C_1(\text{diam } P)$.

Для доказательства следующей леммы используем конструкцию гомеоморфизмов φ_n , описанную в [2].

Лемма 2. Для достаточно больших значений n справедливо неравенство

$$\left| \omega[\varphi^{-1}(D_{uv})] - \omega[\varphi_n^{-1}(D_{uv})] \right| \leq \frac{\tilde{N}_2}{2^n},$$

где $\tilde{N}_2 = C_2(\text{diam } P, \max_S g(x), d)$,

d - диаметр начальной триангуляции сферы.

В условиях леммы 1 и леммы 2 имеем

$$\left| \rho(A, B) - \rho_n(A, B) \right| \leq \frac{C_3}{2^{\frac{n}{2}}}, \quad (5)$$

где $\tilde{N}_3 = C_3(\text{diam } P, \max_S g(x), d)$.

Заметим при этом, что, вообще говоря, для произвольной точки $A \in D \cap D_n$ её преобразы $\varphi^{-1}(A)$ и $\varphi_n^{-1}(A)$ не лежат на одном луче, исходящем из начала координат O . С использованием неравенств (4) и (5) получается следующая оценка отклонения метрик по лучам.

Лемма 3. Фиксируем $\delta > 0$. Предположим, что для любого $n > n_0$ и любых точек $A, B \in D \cap D_n$ выполняется неравенство $|\rho(A, B) - \rho_n(A, B)| \leq \delta$. Тогда существует номер $n_1 \geq n_0$, начиная с которого для любых точек $X, Y \in \tilde{R} \in S$

$$\left| \rho(\psi(X), \psi(Y)) - \rho_n(\psi_n(X), \psi_n(Y)) \right| \leq C_4(\Omega_0) \delta.$$

Доказательство теоремы опирается на лемму 3 и основано на оценке пространственной деформации поверхности при изменении её внутренней метрики [3].

3. Приложения

Пусть $\overrightarrow{OA} = f(x) \vec{x}$ - радиус-вектор точки рассматриваемой поверхности P , $f(x) > 0$. Можно показать (см. [4]), что функция $u(x) = 1/f(x)$ удовлетворяет эллиптическому уравнению Монжа - Ампера на сфере S :

$$\frac{u}{[u^2 + \nabla(u, u)]^{3/2}} \times \left[\det G^{ij} \det \nabla_i \nabla_j u + u \Delta u + u^2 \right] = g(x), \quad (6)$$

где G^{ij} - контравариантный метрический тен-

зор на S , Δu - оператор Бельтрами - Лапласа. В этом смысле многогранники определяют последовательность функций, аппроксимирующих обобщённое решение уравнения (6). Следовательно, доказанная здесь теорема может применяться для оценки скорости сходимости при такой аппроксимации.

Библиографический список

1. Александров, А. Д. Существование и единственность выпуклой поверхности с данной интегральной кривизной / А.Д. Александров // ДАН СССР. 1942, № 35 - с. 143 - 147.
2. Бакельман, И. Я. Чебышевские сети в многообразиях ограниченной кривизны / И.Я. Бакельман // Труды математ. ин-та им. В.А. Стеклова, 1965, № 76 с.124 - 129.
3. Волков, Ю. А. Оценка деформации выпуклой поверхности в зависимости от изменения её внутренней метрики / Ю.А. Волков // Украинский геометрический сборник, 1968, № 5 - 6. - С. 44 - 69.
4. Трубина, О. И. Теоремы существования и единственности для одного класса уравнений Монжа-Ампера / О.И. Трубина // Математические заметки. 1983, Т.34, вып.1. - С.123-130.

ФОРМИРОВАНИЕ НИТЕВИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ ОКСИДА ЦИНКА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВО ВНЕШНЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Представлены результаты экспериментальных исследований роста нитевидных кристаллов оксида цинка при воздействии лазерного излучения на поверхность латунной мишени в условиях ускоряющего электрического поля. Получены нитевидные кристаллы с поперечными с размерами, не превышающими 400 нм

Введение

При воздействии лазерного излучения на цинк или цинкосодержащие материалы инициируется образование структур его оксида. При определенных условиях структуры растут в виде нитевидных кристаллов [1, 2]. Направленный рост кристаллов в случае лазерного испарения и обратного осаждения материала реализуется согласно механизму «пар-жидкость-кристалл» [3]. Лазерно-индуцированное формирование кристаллов оксида цинка имеет ряд преимуществ по сравнению с другими методами. Прежде всего, это возможность получения кристаллов без применения специальных приспособлений (тиглей и кристаллизационных камер). При этом отсутствуют элементы, ограничивающие доступ к области формирования структур для диагностики протекания процесса и дополнительных управляющих воздействий. Последние могут применяться в случае необходимости получения материалов с заданными свойствами и воспроизводимыми характеристиками. В работах [1, 2] показаны результаты формирования кристаллов в основном с поперечными размерами порядка 1 мкм. С точки зрения применения кристаллов оксида цинка в технологиях наноиндустрии необходимы более тонкие структуры.

На характер роста и конечные размеры структур оказывает влияние ряд факторов. Это концентрация исходных реагентов, температура реакционной среды и др. Воздействие внешнего электрического поля позволяет ускорить и упорядочить процесс роста кристаллов и уменьшить их поперечные размеры [4, 5]. Это происходит вследствие того, что поверхность роста

имеет острые края, у которых возникает повышенный градиент поля. В результате приток поляризованных молекул или ионов пара к поверхности роста усиливается. Это увеличивает скорость роста нитевидного кристалла в продольном направлении и позволяет получать более тонкие структуры. В настоящей работе рассматриваются результаты формирования наноструктурированных массивов кристаллов оксида цинка при воздействии лазерного излучения на поверхность латуни во внешнем электрическом поле.

Условия эксперимента

Формирование нанокристаллов оксида цинка осуществлялось при воздействии излучения иттербиевого волоконного лазера ЛС-02 на поверхность мишени из латуни ЛС59-2. Схема эксперимента приведена на рис. 1.

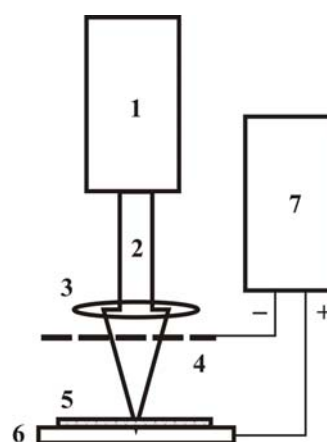


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – иттербиевый волоконный лазер ЛС-02; 2 – лазерное излучение; 3 – объектив; 4 – металлическая сетка; 5 – слой углеродных нанотрубок; 6 – мишень; 7 – источник питания

Излучение лазера 1 мощностью 20 Вт фокусировалось на поверхность мишени 6 объективом 3 с фокусным расстоянием 50 мм в пятно диаметром 100 мкм. При этом интенсивность лазерного излучения на поверхности латуни имела порядок 105 Вт/см². Поверхность латунной мишени была покрыта слоем углеродных нанотрубок толщиной 0,5 мкм. На расстоянии 40 мм от поверхности мишени была установлена металлическая сетка, которая не вносила существенного влияния на прохождение лазерного излучения. Латунная мишень и сетка подключались к источнику питания, и в области взаимодействия лазерного излучения с образцом устанавливалось ускоряющее напряжение 20 В. Время воздействия лазерного излучения на поверхность латунной мишени 10 с. Поверхность мишени нагревалась до высокой температуры, но образования кратера не происходило. Разрушения углеродных нанотрубок также не происходило. Поверхность латуни после обработки лазерным излучением исследовалась при помощи растрового электронного микроскопа Quanta 200 3D. Были зарегистрированы массивы нитевидных кристаллов оксида цинка.

Результаты эксперимента

Полученные методом растровой электронной микроскопии изображения (РЭМ изображения) массивов кристаллов оксида цинка, сформировавшихся при обработке лазерным излучением латунной мишени, подтвердили теоретические предположения о возможности управления их характеристиками при помощи электрического поля. Наложение ускоряющего электрического поля привело к значительному уменьшению диаметра формирующихся нитевидных кристаллов. Полученные кристаллы имеют поперечные размеры от 50 до 400 нм. Длина кристаллов варьируется от 1 до 100 мкм.

Следует отметить, что вследствие ограниченности пятна лазерного излучения и гауссового распределения интенсивности в его пределах однородность формирующихся нанострук-

тур не была достигнута. Выделяются три характерные области роста кристаллов оксида цинка, различающиеся морфологическими характеристиками.

В центральной области лазерного воздействия формируются короткие нитевидные кристаллы (рис. 2). Их поперечные размеры лежат в диапазоне от 200 до 400 нм. Длина структур не превышает 1 мкм. За пределами указанной области характер выросших кристаллов изменяется (рис. 3). Они становятся значительно тоньше и длиннее. Средний диаметр структур не превышает 200 нм. Отмечено значительное количество кристаллов с диаметром около 50 нм. Длина структур от 1 до 10 мкм.

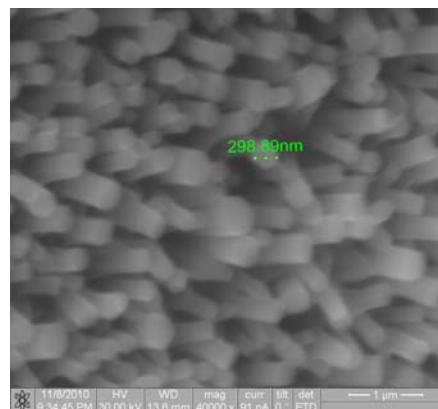


Рис. 2. РЭМ изображение массива наноструктур оксида цинка в центральной области лазерного воздействия

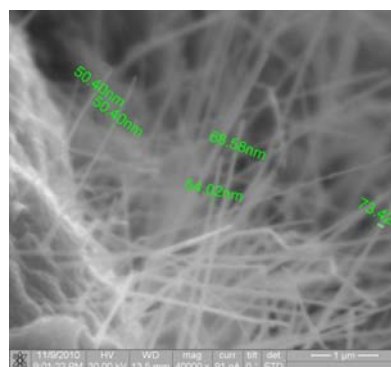


Рис. 3. РЭМ изображение массива длинных и тонких наноструктур оксида цинка

На границе области воздействия лазерного излучения образовался массив структур со сложной структурой (рис. 4). Кристаллы оксида

цинка в данной области сильно различаются по своим размерам. Встречаются очень крупные структуры с размерами порядка 1 мкм. Кристаллы сильно ветвятся. По-видимому, в данной пограничной области имеют место сильно нестационарные условия, что приводит к хаотизации процесса формирования структур. Отмечено стремление к образованию пластинчатых ответвлений, аналогичных образованиям наблюдаемых в экспериментах без электрического поля. Влияние внешнего электрического поля выражено в том, что пластинчатые образования оксида встречаются редко. В основном вместо пластин образуются системы стержней, перпендикулярных основному нитевидному кристаллу (рис. 4,б).

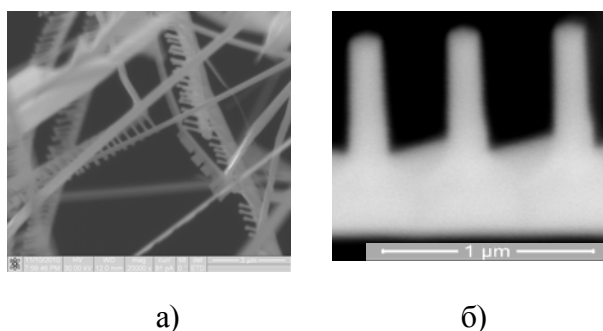


Рис. 4. РЭМ изображение наноструктур оксида цинка на границе области лазерного воздействия: а – массив структур; б – система стержней, перпендикулярных основному нитевидному кристаллу

Заключение

Наложение дополнительных условий, а именно внешнего электрического поля, существенно изменило характер роста нитевидных кристаллов оксида цинка при лазерном воздействии на поверхность мишени из цинкосодержащей латуни. Поперечные размеры формирующихся структур уменьшились не менее чем на порядок. Получены нитевидные кристаллы с диаметром около 50 нм. По-видимому, влияние ускоряющего электрического поля выражается

в значительном увеличении скорости роста кристаллов в направлении их продольной оси по сравнению с поперечным направлением. Получены массивы квазиориентированных перпендикулярно поверхности мишени нитевидных кристаллов с близкими по величине поперечными размерами. Представляет интерес формирование систем стержней, перпендикулярных основному нитевидному кристаллу на границе области воздействия лазерного излучения на поверхность материала.

Работы выполнены при финансовой поддержке в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 годы» и АВЦП "Развитие научного потенциала высшей школы".

Библиографический список

1. Атаев, Б.М. Нитевидные кристаллы оксида цинка / Б.М. Атаев, И.К. Камиллов, В.В. Мамедов // Письма в ЖТФ. – 1997. – Т. 23. – № 21. – С. 58-63.
2. D V Abramov, T.N. Gorudko, A.N. Koblov, D.S. Nogtev, O.A. Novikova. Laser Forming of Structures of Zinc Oxide on a Surface of Products from Copper Alloys. *Physics Procedia*. – 2010. – V. 5. – Part 2. – P. 211 – 214.
3. Wagner R.S, Ellis W.C. Vapor-liquid-solid mechanism of single crystal growth. *Appl. Phys. Lett.* – 1964. – V. 4. – P. 89-90.
4. K.G. Libbrecht, V.M. Tanusheva. Cloud chambers and crystal growth: Effects of electrically enhanced diffusion on dendrite formation from neutral molecules. *Phys. Rev. E*. – 1999. – V. 59. – № 3. – P. 3253-3261.
5. Козлова, О.Г. Рост и морфология кристаллов / О.Г. Козлова. – М: МГУ, 1980. – 357 с.

О.Р. Никитин, А.Н. Данилов, В.В. Яковлев

МИКРОВОЛНОВЫЙ РАДИОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД РАННЕГО ОБНАРУЖЕНИЯ НОВООБРАЗОВАНИЙ В БИООБЪЕКТАХ

Рассмотрено использование СВЧ радиометрии для обнаружения злокачественных новообразований. Представлена схема эксперимента и экспериментальные данные, полученные на первых этапах исследования

Злокачественные образования на сегодняшний день – одна из основных проблем, встречающихся довольно часто. На данный момент медиками и инженерами разрабатываются способы борьбы с данной проблемой. Одной из приоритетных проблем является своевременное обнаружение злокачественных новообразований, пока они еще не увеличились в размерах и не распространились по организму в виде так называемых метастазов. Одним из вариантов диагностирования можно назвать радиометрический микроволновый метод.

Методы исследования организма человека, использующие регистрацию собственных физических полей человека, позволяют получить информацию о процессах в организме, которую нельзя получить иными способами или они требуют довольно много усилий с возможным причинением вреда человеческому организму. При рассмотрении в отдельности органов человека необходимы разная аппаратура, тип воздействия, методы и т.д. в связи с тем, что в каждом органе имеются многочисленные заболевания, которые обладают разными свойствами, имеющие собственную структуру, не похожую на другие, свое специфическое расположение, размеры и многие другие факторы. В медицине имеются установки, определяющие то или иное заболевание и дополняющие друг друга.

Специалисты отмечают, что "клинически раннее" выявление опухоли с биологической точки зрения, считается "поздним". Скрининг с целью раннего выявления рака молочной железы, проводимый по общепринятой методике через 12-24 месяца, не может гарантированно выявить опухоли с бурным ростом, которые составляют 1/4 всех онкозаболеваний [1].

Показано [2], что удельное тепловыделение в опухоли прямо пропорционально скорости ее роста, т.е. быстро растущие опухоли более "го-

рячие", и поэтому лучше видны на термограммах. Таким образом, микроволновая радиометрия обладает уникальной способностью обнаруживать в первую очередь быстро растущие опухоли. Введение в комплексную диагностику радиометрических обследований приведет к естественной диагностической селекции онкозаболеваний молочной железы с бурным ростом опухоли [3].

Интенсивность этого радиотеплового излучения биотканей пропорциональна температуре тела. Злокачественные опухолевые процессы повышают температуру тканей и соответственно радиояркую температуру.

Грудные опухоли в микроволновом диапазоне имеют электрические свойства, значительно отличающиеся от таковых у здоровых грудных тканей [4], что подтверждает применимость и очевидную ценность именно СВЧ-методов для обнаружения опухолевых образований в тканях молочной железы.

Распространение микроволнового сигнала зависит в основном от диэлектрической проницаемости, а не от плотности среды. Диэлектрическая проницаемость изменяется от 5 до 50, в то время как плотность мягких тканей меняется в пределах нескольких процентов. Такой широкий диапазон изменения диэлектрической проницаемости указывает на возможность получения большого контраста в изображении и лучшей идентификации тканей. К тому же энергия СВЧ-фотонов достаточно мала и не вызывает ионизацию в биологических тканях при стандартных интенсивностях. Таким образом, при СВЧ-излучении отсутствуют присущие рентгеновскому излучению побочные негативные эффекты [4].

Проведен ряд экспериментов, цель которых - показать принципиальную пригодность ис-

пользования СВЧ-методов при диагностике злокачественных образований. В качестве модели биообъекта использовался пенополиуретановый объем. Имитация опухоли осуществлялась посредством графитовых включений, поскольку графит имеет диэлектрическую проницаемость такую же, как и раковые клетки. Модель биологического объекта облучалась электромагнитным СВЧ-полем; одновременно при помощи модуляционного радиометра, используемого в режиме СВЧ-присмника, фиксировался отражённый от модели сигнал. Так как графит, выступающий в роли новообразования, имеет диэлектрические свойства, отличные от свойств пенополиуретана, то по уровню отражённого сигнала можно судить, есть ли внутри биообъекта плотная вставка «новообразования» или нет. Проведённые эксперименты показали хороший результат.

В качестве дальнейшего развития экспериментальных исследований и разработки более совершенных способов диагностики предлагается использовать не только активные, но и пассивные методы радиометрии.

Пассивный метод позволяет измерять температурные разности в груди, обнаруживать опухоли, основываясь на их повышенной температуре по сравнению с нормальной тканью. Преимущество использования такого подхода в сравнении с инфракрасным тепловидением состоит в возможности измерения глубинных температурных характеристик. Кроме того, преимуществом подобного метода является то, что организм человека при обследовании не будет подвергаться каким-либо внешним воздействиям. Метод не подразумевает осуществления хирургических разрезов или же облучения электромагнитными полями, а следовательно, он полностью безопасен.

Глубина, с которой принимается радиоизлучение, определяется длиной волны радиометра и поглощающими характеристиками среды. По поглощающим характеристикам все типы биотканей можно разделить на два типа: ткани с низким и высоким содержанием воды. Первые характеризуются низким, а вторые - высоким поглощением электромагнитных волн радиодиапазона. На рис. 1 приведена зависимость глубины от частоты, на которой интенсивность

падающего радиоизлучения уменьшается в e^2 раз (глубина скин-слоя) для этих двух типов биотканей. Она изменяется от 2 до 10 см в зависимости от длины волны. Представленная глубина $l_{ск}$ проникновения плоских волн в различные типы биотканей в зависимости от частоты f определена на основе известных экспериментальных данных [2]. При этом используются следующие обозначения: 1 - ткани с низким содержанием воды (жир, кости); 2 - ткани с высоким содержанием воды (кожа, мышцы); 3 - раковые опухоли.

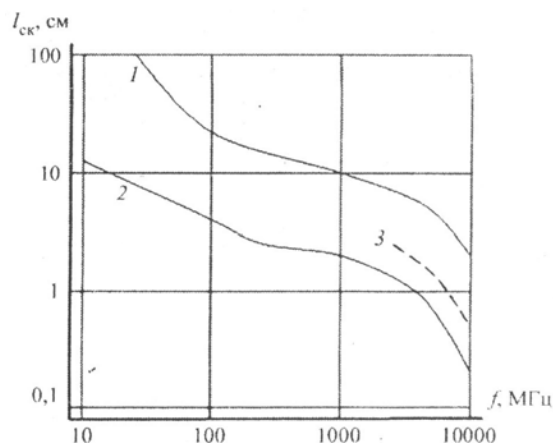


Рис. 1. Зависимость глубины проникновения в биоткани СВЧ-сигнала от частоты

Таким образом, изменяя длину волны, можно выбрать эффективную глубину зондирования. Однако большая глубина зондирования, обеспечиваемая на больших длинах волн, сочетается потерей пространственного разрешения, которое ухудшается с ростом длины волны. При зондировании среды из свободного пространства предельное пространственное разрешение равно половине длины волны. Поэтому улучшить разрешение можно только за счет контакта поверхности антенны со средой, т.е. путем использования антенн-аппликаторов. Применение подобных антенн также позволяет уменьшить влияние отражения. Подобная методика получила название *аппликационной*, или *контактной*.

Как при дистанционной, так и при аппликационной методиках радиометр принимает мощность излучения, интенсивность которого определяется двумя процессами: собственным излучением исследуемого объекта и переотражени-

ем излучения окружающей среды. В случае применения аппликационной методики излучение окружающей среды эквивалентно излучению измерительного прибора.

Экспериментальная установка для проведения диагностических процедур по обнаружению злокачественных опухолей представлена на рис. 2.

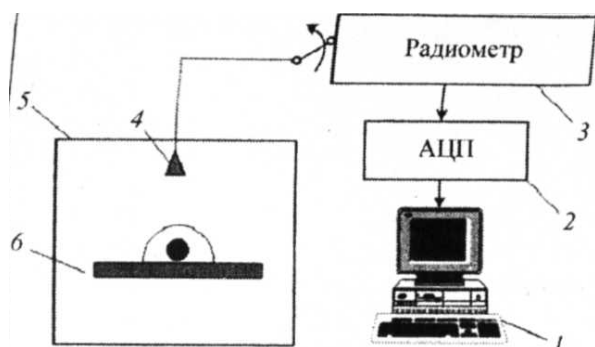


Рис. 2. Схема эксперимента:
1 - компьютер, необходимый для сбора и обработки информации; 2 - аналого-цифровой преобразователь (АЦП); 3 - радиометр; 4 - приемная антенна; 5 - безэховая камера; 6 - макет биоткани с помещённой внутрь имитацией новообразования

Модель помещается в безэховую камеру, которая изолирует от внешних сигналов и препятствует возникновению отражений радиоволн от стен. Стены, потолок и пол таких камер покрыты материалом, поглощающим электромагнитные волны. Это позволяет измерять сигнал, пришедший непосредственно от источника, исключив отражения от стен и шум извне, сформировав таким образом нахождение источника в свободном пространстве.

Описанный выше эксперимент предполагает проведение целого ряда исследований. Ставится задача определения минимальных размеров опухоли, при которых она может быть чётко зафиксирована. Использование радиометров с различной рабочей длиной волны (3-100 мм) и нескольких типов приёмных антенн позволит подобрать оптимальные характеристики приборов, дающих наиболее точные и достоверные итоговые результаты. Опираясь на данные радиометрических измерений собственного излучения макета груди с опухолью и без неё, удастся определить ту разницу в показаниях прибора, по которой и будет делаться вывод либо о

наличии, либо об отсутствии новообразования. Кроме того, применение узконаправленных антенн позволит локализовать конкретное местонахождение опухоли.

В качестве моделей, имитирующих жировую ткань молочной железы с еж-4 [4], использовались вещества со схожими диэлектрическими свойствами: пенополиуретан ($\epsilon=1,5$), силикон ($\epsilon=3,3$), фторопласт ($\epsilon=2,0$), поролон, пропитанный 1%-ным раствором NaCl ($\epsilon=3,8$), смесь глицерина и растительного масла ($\epsilon=4,5$), свиной жир в кожаном объеме. В качестве неоднородности использовался графит с разными геометрическими размерами (см. таблицу).

Номер образца	Геометрические размеры, см
1	0,5×0,5×0,5
2	1,0×1,0×1,0
3	1,5×1,2×1,2
4	2,0×2,0×1,5

На рис. 3 представлены зависимости контрастов яркостной температуры поролоновой модели, пропитанной 1 %-ным раствором NaCl, без неоднородности и с помещенными внутри нее на разных глубинах Δh неоднородностями разных размеров (графит).

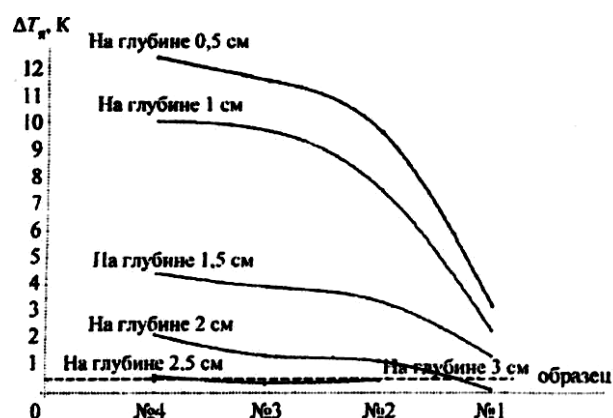


Рис. 3. Распределение глубинных контрастов яркостной температуры для поролоновой модели, пропитанной 1 %-ным раствором NaCl в зависимости от размера

На рис. 4 отображен график временной зависимости выходного напряжения АЦП, полу-

ченный в ходе экспериментов при наличии и отсутствии неоднородности.

У_{вых}, В

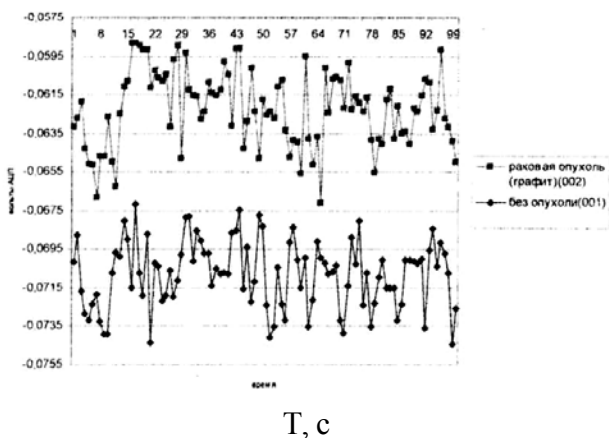


Рис. 4. Моделирование злокачественного образования с помощью графита

На графике (см. рис. 4) четко можно увидеть разницу излучаемой радиояркой температуры муляжа без графита и с ним, на основе которых можно сказать о наличии в биологическом объекте злокачественных новообразований.

Полученные результаты могут служить основой создания новой неинвазивной системы СВЧ-диагностирования новообразований в молочной железе. Резюмируя возможности и перспективы использования СВЧ-радиометрии в медицине, необходимо отметить, что СВЧ-радиометрия позволяет:

- определить местонахождение в организме биообъекта и патологические термоизменения;
- регистрировать характеристики электромагнитных сигналов биообъектов и установить связь между параметрами этих характеристик и физиологическими параметрами биообъекта;
- корректировать процесс лечения по изменению параметров электромагнитного поля биообъекта.

Библиографический список

1. Бурдина, Л. М. Применение радиотермометрии для диагностики рака молочной железы / Л.М. Бурдина [и др.] // – Маммология. – 1998. – №2. – С. 3-12. – ISSN 0300-9092.
2. Гаврилов, В. М. Применение электромагнитных полей СВЧ в медицине и биологии:

учеб. пособие / В.М. Гаврилов [и др.]. Владим. гос. ун-т. Владимир, 2001. – 139 с. – ISBN 5-89368-284-X.

3. Моисеенко, В. М. Кинетические особенности роста рака молочной железы и их значение для раннего выявления опухоли / В. М. Моисеенко, В. Ф. Семиглазов // Маммология. – № 3. 1997. – С.3-12. –ISSN: 5-89481-429-4.

4. Никитин, О. Р. Радиофизические методы моделирования патологий биообъектов: учеб. пособие / О. Р. Никитин [и др.]; Владим. гос. ун-т, – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2006. – 171с. – ISBN 5-9307-025-6.

5. Carr K.L. Microwave Radiometry: its Importance to the Detection of Cancer. IEEE MTT, vol.37 №12 Dec.1989.

ПАССИВНЫЙ МИКРОВОЛНОВЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ

Предложены пассивные СВЧ-методы мониторинга сейсмической картины в почве, представлены основные положения метода

Цель работы – повышение достоверности и оперативности прогнозирования землетрясения. Основные задачи для решения поставленной цели:

- выявление связи между электродинамическими характеристиками почвы, собственным электромагнитным излучением и сейсмической активностью;

- разработка радиометрической (пассивной) СВЧ-системы мониторинга состояния сейсмической активности (определение смещений и разрывов структуры материи в недрах планеты).

Пути решения. Пассивные СВЧ-методы (радиометрические) мониторинга Земли используют модели электромагнитных полей земных структур и поверхностей. При реализации рассматриваемого метода имеют место электродинамические модели поверхностного слоя земной коры, а также модели Дебая для различных видов почв (сухая, влажная). Главным критерияльным параметром почвы, представляющим интерес для исследования, является объемная влажность W , поскольку данный параметр является аргументом комплексной электродинамической функции почвы. Диэлектрическая проницаемость связанной воды определяется косвенным методом посредством диэлектрических моделей смесей. Кроме того, модели, работающие во всем диапазоне значений объемных долей компонент смесей, являются приближенными. Наиболее подходящей для решения задач дистанционного микроволнового зондирования считается рефракционная модель смеси, включающая сухую почву, связанную и свободную воду [5]:

$$\sqrt{\epsilon} = \sum_i V_i \sqrt{\epsilon_i}.$$

Здесь ϵ – диэлектрическая проницаемость смеси, ϵ_i , V_i – диэлектрическая проницаемость и объемные доли компонент соответственно. Диэлектрическая проницаемость сухой почвы слабо зависит от ее плотности (точнее, от доли твердой фазы). Но диэлектрическая проницаемость связанной воды в области малых влажностей, когда вся вода в почве находится в связанном состоянии, зависит от количества связанной жидкости. При малом увлажнении вода образует на поверхности частиц мономолекулярные слои. Наиболее прочно связан с поверхностью первый мономолекулярный слой. В каждом последующем слое молекулы воды связаны с поверхностью менее прочно. Таким образом, каждой элементарной порции почвенной влаги можно придать свое значение диэлектрической проницаемости.

Исходя из модели Дебая для связанной воды, можно записать следующие выражения для действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости связанной воды соответственно [6]:

$$\epsilon'_b - \epsilon_\infty = \frac{1}{W} \int_0^W \frac{(\epsilon_{0b}(W) - \epsilon_\infty) dW}{1 + \omega^2 \tau^2(W)};$$
$$\epsilon''_b = \frac{1}{W} \int_0^W \frac{(\epsilon_{0b}(W) - \epsilon_\infty) \omega \tau(W) dW}{1 + \omega^2 \tau^2(W)} + \frac{1}{W} \int_0^W \sigma(W) dW,$$

где ϵ_{0b} , ϵ_∞ – статическая и высокочастотная диэлектрические проницаемости связанной воды соответственно, $\tau(W)$ – время релаксации, $\sigma(W)$ – проводимость, W – влажность почвы, ω – круговая частота в вакууме. При моделировании зависимости диэлектрической проницаемости почвы от влажности предполагается связывать время релаксации с капиллярно-сорбционным потенциалом почвенной влаги [6]. При этом ϵ_{0b} – величина постоянная, рав-

ная статической диэлектрической проницаемости свободной воды, а высокочастотная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_{\infty} = 4,9 - 5,1$.

Определяющим фактором классификации влажной почвы будут объемная влажность и среднее распределение воды, позволяющие определить свободную, связанную воду и комбинированный тип влаги. Степень влияния жидкости на электродинамические параметры различна. Характер взаимосвязи комплексной диэлектрической проницаемости от объемной влажности нелинеен и имеет вид (рис. 1).

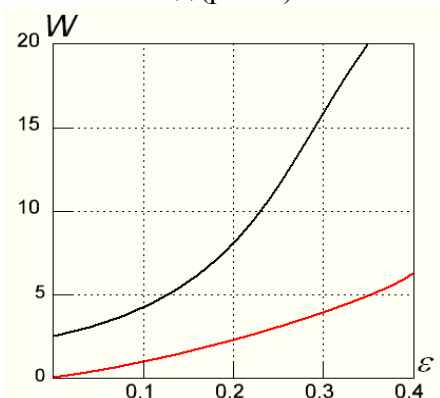


Рис. 1. Связь электродинамических параметров почвы с величиной объемной влажности

Сейсмическая активность наряду с внесением изменений в структуру почвы служит причиной возникновения электромагнитных предвестников землетрясений, наличие которых объясняется как результат электрокинетического эффекта, возникающего при фильтрации подземной жидкости по капиллярным трещинам [2]. Сейсмоэлектрические явления в однородной среде, граничащей с атмосферой, не могут привести к образованию магнитных полей. Однако вблизи границ неоднородностей можно ожидать появления магнитных полей, обусловленных электрокинетическими явлениями. Поэтому неоднородность среды, где происходит резкое изменение её свойств, приводит к возмущениям потенциала, которые медленно убывают с расстоянием. Течение жидкости в капиллярах и трещинах, содержащихся в породе, обусловлено перепадом давления в жидкости, который может возникнуть из-за перераспределения тектонических напряжений вследствие каких либо подвижек в районе очага землетрясения.

Часть ионов воды вследствие процессов адсорбции и гидратации связывается со стенками капилляров. Ионы противоположного знака, остающиеся в жидкости, увлекаются ею, создавая конвективный ток. В результате на концах капилляров появляется разность потенциалов и возникает электрический ток, противоположный конвективному току. Конвективные токи и токи проводимости возмущают электромагнитное поле Земли, что может приводить к локальным аномалиям. Разность потенциалов $\Delta\phi$ в жидкости, обусловленная перепадом давления ΔP на концах капилляра, имеет вид [2]:

$$\Delta\phi = \frac{\epsilon\epsilon_0\zeta p_l}{\eta} \Delta P,$$

где ϵ – диэлектрическая проницаемость раствора, p_l – удельное сопротивление раствора, ζ – электрокинетический потенциал, равный контактной разности потенциалов между стенками капилляра и жидкостью, η – коэффициент вязкости жидкости.

Плотность электрокинетического тока также зависит от величины ΔP . Следует отметить, что в данном случае (большая глубина) под величиной P подразумевается избыточное над гидростатическим давление поровой жидкости. Кроме того, давление в волне является переменной величиной, поэтому в данном случае существенно зависимость электрокинетического эффекта от частоты акустической волны.

В работе предполагается использование инерционного механизма генерации электромагнитных полей. Его суть заключается в том, что основное внимание уделяется процессу увлечения ионов жидкости в капиллярах вследствие инерционного движения жидкости относительно твёрдого скелета [2]. Инерция возникает из-за ускорения среды в сейсмической волне. Следует отметить, что данный механизм можно рассматривать как проявление сейсмоэлектрического эффекта при высоких частотах.

Пусть скорость частиц твёрдой фазы $v(r, t)$ – известная функция. Тогда в системе координат, связанной с твёрдым скелетом, на единицу объёма жидкости в капиллярах действует сила

инерции, а зависимость тока от ускорения в сейсмической волне аналогична известному закону Толмена - Стюарта для проводящей среды, причём роль массы электронов играет некоторая эффективная масса, зависящая от параметров среды [2]:

$$j = \sigma E + C_i v;$$

$$C_i = \frac{n \epsilon \epsilon_0 \zeta \rho}{\eta}.$$

Здесь n – некоторый безразмерный коэффициент, C_i – коэффициент потокового потенциала или электрокинетический коэффициент, σ – средняя электропроводность среды.

В первом выражении левое слагаемое, зависящее от напряжённости электрического поля E , описывает электрический ток, а второе слагаемое – электрокинетический ток. В простейшей модели n – пористость среды. В более сложных моделях этот коэффициент учитывает извилистость, проницаемость проводящих каналов.

Инерционный эффект может проявляться непосредственно на афтершоках, то есть относится к косейсмическим явлениям, сопутствующим распространению сейсмических волн. Данные соотношения базируются на предположении, что сейсмическая волна распространяется по твёрдой фазе, относительно которой поровая жидкость приобретает некоторое ускорение.

Параметры среды и градиент давления зависят от многих факторов. В частности, для оценки ожидаемого электромагнитного эффекта необходимо задаваться размером, глубиной залегания водопроницаемого фильтрующего пласта, проницаемостью и размерами каналов. Таким образом, глубину влияния сейсмических волн на радиоизлучение земной поверхности можно определить исходя из оценки градиента давления в сейсмической волне в среде [2], плотность которой $\rho = 2 \cdot 10^3$ кг/м³, скорости вещества $v = 0,1$ м/с и частота сейсмической волны $\nu = 1$ Гц, максимальное значение величины ожидаемого эффективного излучения:

$|\nabla P| = \rho \nu v$, где ∇P – избыточное над гидростатическим давление поровой жидкости. Отсюда $E \sim |\nabla P| C \sim 2 - 200$ мкВ/м, где C – коэффициент потокового потенциала или электрокинетический коэффициент. Данная оценка имеет локальный характер и применима к влажным участкам поверхности, содержащим достаточное количество связанных между собой капилляров и трещин. Такого же порядка величины возмущения образуются при индукционном сейсмомагнитном эффекте.

В настоящее время существует несколько электродинамических моделей, отличающихся способностью адаптации к реальным условиям. С учетом специфики задачи и организации исследования была выбрана электродинамическая модель поверхности с мелкомасштабными неровностями, адаптированная под использование в условиях открытой местности с плавными перепадами уровня почвы. Продуктом моделирования является зависимость радиояркости температуры от угла наблюдения с учетом электродинамических параметров местности. Характер зависимости нелинейный, а радиояркость температура является функцией нескольких аргументов, таких как диффузная $K_{\text{æèð}}$ и когерентная $K_{\text{èîä}}$ компоненты интегрального коэффициента рассеяния [1]

$\dot{K}_{\text{èð}}(\epsilon, \theta) = \dot{K}_{\text{èîä}}(\epsilon, \theta) - \dot{K}_{\text{æèð}}(\epsilon, \theta)$ излучаемого поля. Основополагающее соотношение при моделировании имеет вид [1]

$$T_{y\delta} = \left(1 - \left| \dot{K}_{\text{èð}}(\epsilon, \theta) \right|^2 \right) T_0,$$

где $\dot{K}_{\text{èð}}(\epsilon, \theta)$ – комплексный интегральный коэффициент рассеяния поля, определяющий интенсивность эмиссии излучения поверхность, T_0 – температура окружающей среды.

Характер зависимости радиояркости температуры от электромагнитных параметров почвы различен и определяется отдельно для конкретного случая. На рис. 2 показана зависимость радиояркости температуры от диэлек-

трической проницаемости влажной почвы в отсутствие сторонних источников излучения при угле наблюдения 90° .

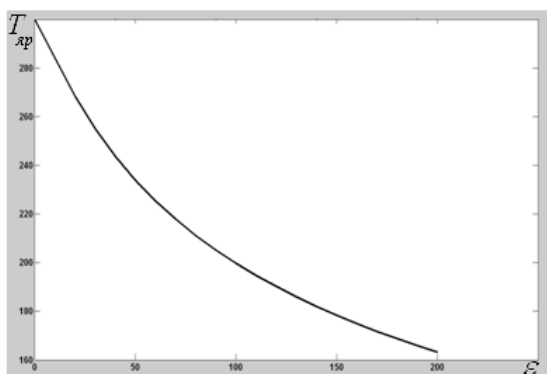


Рис. 2. Зависимость радиояростной температуры от диэлектрической проницаемости для случая влажной почвы

Процедуру мониторинга радиояростной температуры осложняет ряд факторов, искажающих информацию. При любых условиях измерения всегда существуют сторонние источники излучения, причем фоновый уровень сторонних источников в редких случаях может даже превысить уровень полезного излучения. Наиболее распространенным сторонним источником считается колебание температуры окружающей среды, которое напрямую зависит от состояния солнца, наличия облаков над областью мониторинга. Поскольку алгоритм вычисления теоретического значения параметра на ЭВМ занимает весьма короткий промежуток времени, то влияние вышеупомянутого стороннего источника минимизировано.

Данный метод при надлежащей организации измерений достаточно чувствителен, поэтому есть возможность регистрации даже незначительных изменений в структуре поля, излучаемого поверхностью. Таким образом, при мониторинге видны действия многочисленных внезапных изменений структуры, несомненно, далеко не все изменения приводят к землетрясе-

ниям, но при заданных интенсивности, периоде и масштабности изменения появляется возможность судить о возможных последствиях и существенно снизить количество человеческих жертв и уровень ущерба.

Библиографический список

1. Волосюк, В. К. Математические методы моделирования физических процессов в задачах дистанционного зондирования Земли / В. К. Волосюк, В.Ф. Кравченко // Успехи современной радиоэлектроники. 2000. – № 8. С. 3–75.
2. Сурков, В. В. Электромагнитные эффекты при землетрясениях и взрывах / В.В. Сурков. – М: МИФИ, 2000. С 237. – ISBN 5-7262-0361-5.
3. Волосюк, В.К. Синтез оптимальных алгоритмов дистанционных измерений электрофизических параметров поверхностей по данным регистрации их собственного радиотеплового излучения / В.К. Волосюк, В.Ф. Кравченко // Измерительная техника. – 1993. – № 8. – С. 48-49.
4. Беляева, Т.А. Определение параметров моделей диэлектрической проницаемости почв с различной плотностью и различным содержанием гумуса по данным экспериментальных измерений в частотном диапазоне 0,1-20 ГГц. / Т.А. Беляева [и др.] // Исследование Земли из космоса. – 2003. – №5. С. 28-34.
5. Mironov V.L., Dobson M.C., Kaupp V.H., Komarov S.A., Kleshchenko V.N. Generalized refractive mixing dielectric model for moist soils // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 2004. Vol. 42. No. 4.
6. Спиридонов, В. И. Релаксационная модель диэлектрических свойств воды в гетерогенных смесях / В.И. Спиридонов // Измерительная техника. – 1982. – № 5. – С. 68-70

О НОРМАЛЬНЫХ ФОРМАХ СЕМЕЙСТВ УРАВНЕНИЙ СМЕШАННОГО ТИПА НА ПЛОСКОСТИ

Получены конечно-гладкие нормальные формы деформаций линейных уравнений смешанного типа с частными производными на плоскости вблизи точки эллиптичности либо гиперболичности уравнения, а также регулярной точки линии смены типа и сложенных нерезонансных особых точек типа седло, узел и фокус.

1. Введение

Изучение процессов различной природы нередко приводит к их математическим моделям, зависящим от параметров, имеющих конкретные значения при каждой реализации процесса, но, вообще говоря, изменяющихся от реализации к реализации. Например, в одной из простейших математических моделей - в модели Мальтуса $\dot{x} = km - kx$ параметром является коэффициент k , доставляемый разностью между коэффициентами рождаемости и смертности.

В данной работе локальные нормальные формы семейств уравнений с частными производными на плоскости получены локально в гиперболической и эллиптической области уравнения, а также вблизи регулярной точки либо сложенной нерезонансной особой точки линии смены уравнения. Точнее, на плоскости $\mathbb{R}_{x,y}^2$ левую часть семейства уравнений вблизи таких точек

$$a(x, y, s)u_{xx} + 2b(x, y, s)u_{xy} + c(x, y, s)u_{yy} = F(x, y, u_x, u_y, u, s), \quad (1)$$

где s - конечномерный параметр семейства, a, b, c - гладкие функции, F - некоторая функция, мы приводим к нормальной форме гладкими или достаточно гладкими заменами переменных, расслоенными над пространством параметра, и домножением на гладкие или достаточно гладкие функции от x, y, s .

Определение 1. Два объекта одной природы (=отображения, множества и т.п.) называются *равными в точке*, если они совпадают в некоторой окрестности этой точки.

Понятно, что равенство в точке - это отношение эквивалентности.

Определение 2. Класс эквивалентности объектов по отношению к равенству в точке называется *ростком объекта в этой точке*.

Определение 3. *Характеристическое направление* уравнения (1) - это решение $dx:dy$ уравнения

$$a(x, y, s)dy^2 - 2b(x, y, s)dx dy + c(x, y, s)dx^2 = 0. \quad (2)$$

Последнее уравнение называется *характеристическим* для уравнения (1).

Определение 4. Ростки двух семейств уравнений (2) с гладкими коэффициентами называются C^k - *эквивалентными*, $k \geq 0$, если существуют представители этих ростков, в областях определения которых множества интегральных кривых этих уравнений переводятся одно в другое C^k - гладким диффеоморфизмом этих областей определения, расслоенным над пространством параметра. Если такая эквивалентность существует для любого конечного $k \geq 0$ (без указания точного класса гладкости), то эти ростки называются *конечно-гладко эквивалентными*.

Понятно, что если используемая эквивалентность не меняет свойства исследуемых объектов, то изучение таких объектов разумно проводить в их наиболее простой форме. Эта идея А. Пуанкаре привела в прошлом веке к бурному развитию теории нормальных форм различных объектов и получению соответствующих классификаций. В частности, для уравнений (2) без параметра сначала были найдены его локальные нормальные формы Лапласа и волново-

го уравнения вблизи точки эллиптичности и гиперболичности этого уравнения, то есть там, где дискриминант $\Delta = b^2 - ac$ отрицателен и положителен соответственно. Затем была найдена нормальная форма Трикоми-Чибрарио этого уравнения вблизи *регулярной* точки линии смены типа, где дискриминант равен нулю, его дифференциал нет, а характеристическое направление уравнения не касается линии смены типа.

Следующее утверждение - простое обобщение этих классических результатов на случай семейств уравнений.

Предложение 1. Для любого конечномерного параметра ε росток семейства уравнений (2) в точке эллиптичности либо гиперболичности уравнения, либо регулярной точки линии смены типа C^∞ эквивалентен ростку в нуле семейства уравнений либо

$$\begin{aligned} dy^2 + dx^2 = 0, \text{ либо} \\ dy^2 - dx^2 = 0, \text{ либо ещё} \\ dy^2 + x dx^2 = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

соответственно.

Доказательства этих утверждений повторяют классические, и параметр при этом существенной роли не играет, поэтому эти доказательства здесь не приводятся. Их можно найти в [2] для последнего случая и в [3] для первых двух. Для семейства уравнений (1) это приводит к нормальным формам соответственно

$$\begin{aligned} u_{xx} + u_{yy} &= F(x, y, u_x, u_y, u, \varepsilon), \\ u_{xx} - u_{yy} &= F(x, y, u_x, u_y, u, \varepsilon), \\ u_{xx} + x u_{yy} &= F(x, y, u_x, u_y, u, \varepsilon). \end{aligned}$$

Более сложные случаи - случаи сложенных особых точек - рассмотрены в следующем параграфе.

2. Нормальные формы вблизи нерезонансных сложенных особых точек.

Здесь мы предполагаем, что

- левая часть уравнения (2) при заданном значении параметра (которое выбирается за ноль - начало координат в пространстве па-

раметров) невырождена как функция от x, y, dx, dy ;

- само уравнение задаёт гладкую *поверхность уравнения* в пространстве направлений на плоскости;

- а *складывание* уравнения - ограничение на эту поверхность канонической проекции вдоль оси направлений (=вертикальной оси) $(x, y, dx, dy) \rightarrow (x, y)$

имеет лишь критические точки типа складка Уитни.

Эти критические точки образуют *криминанту* уравнения. На поверхности уравнения определена гладкая *инволюция складывания* - переставляющая точки с одинаковыми образами при складывании уравнения. Поле характеристических направлений уравнения поднимается до гладкого поля направлений на этой поверхности, вообще говоря, с особыми точками. Это поле в точке поверхности задается пересечением касательной плоскости и контактной плоскости (содержащей характеристическое направление и вертикальное). Отметим, что особые точки поля направлений уравнения - это в точности точки криминанты, где эти две плоскости одинаковы. В остальных точках криминанты это поле вертикально, а его значение является собственным направлением производной инволюции складывания с собственным числом -1 .

Дифференцируемая инволюция σ с линией неподвижных точек и векторное поле называются *согласованными* в точке этой линии, если вблизи этой точки определитель матрицы, составленной из значений этого поля и его образа при этой инволюции, имеет нуль второго порядка на этой линии. Такая же инволюция и поле направлений согласованы в точке этой линии, если это поле можно задать векторным полем, согласованным с этой инволюцией в этой точке. Аналогично вводится понятие согласованности и для дифференцируемых семейств пар полей и инволюций с одним и тем же параметром.

Отметим, что для типичного уравнения (2) инволюция складывания и поле направле-

ний уравнения на его поверхности согласованы в любой точке кривинанты. Два ростка объектов одной природы (векторных полей, отображений,...) называются C^k – эквивалентными, если они переводятся один в другой C^k – диффеоморфизмом, переводящим локально фазовые кривые поля v в себя. Для ростков семейств объектов C^k – эквивалентность – это C^k – диффеоморфизм, сохраняющий естественное расслоение над пространством параметра семейства и переводящий фазовые кривые поля $(v, \dot{s} = 0)$ в себя; C^k – эквивалентность сильная, если к тому же она не меняет параметр.

Теорема 1. Для гладкого семейства v векторных полей ростки в нуле двух гладких семейств инволюций σ_1 и σ_2 с тем же конечномерным параметром ε сильно C^k – эквивалентны, если эти семейства инволюций имеют одну и ту же поверхность неподвижных точек, проходящую через ноль, согласованы с этим семейством векторных полей в нуле, а векторное поле $(v, \dot{s} = 0)$ трансверсально этой поверхности почти всюду вблизи нуля.

Применяя теперь эту теорему к конечно гладким нормальным формам деформаций нерезонансных особых точек векторных полей на плоскости, полученным в [5], находим

Теорема 2. Для любого заданного конечно порядка гладкости $r \geq 1$ конечно параметрическая гладкая деформация ростка характеристического уравнения (2) в его нерезонансной сложной особой точке приводится к росту в нуле деформации

$$dy^2 - (y - k(s)x^2)dx^2 = 0,$$

где ε – параметр деформации, k – некоторая функция, подходящим выбором расслоенных на параметром C^r координат и домножением уравнения на не обращающуюся в ноль функцию от x, y и s .

Резонансность невырожденной сложной особой точки уравнения (2) определяется

как резонансность невырожденной особой точки дифференцируемого векторного поля, задающего поле направлений этого уравнения вблизи изучаемой точки на этой поверхности. Для сложных узлов и фокусов можно взять класс гладкости $r = \infty$. Функция k вычисляется по собственным числам линеаризации поднятого поля в изучаемой особой точке и равна $\alpha(s)/[4(\alpha(s)+1)^2]$ для седла и узла с α – отношением наибольшего по модулю собственного числа к наименьшему, и $\alpha^2(s) + 1/16$ для фокуса с α – модулем отношения мнимой части собственного числа к вещественной. Отметим, что в качестве модельных уравнений здесь можно выбрать уравнения с $k(s)$, равным -1 для седла, $1/20$ для узла и 1 для фокуса (см. [1], [4] для случая без параметра).

Библиографический список

1. Давыдов, А.А., Нормальная форма уравнения, не разрешенного относительно производной, в окрестности его особой точки / А.А. Давыдов // Функциональный анализ и его приложения, 1985. Т. 19, вып. 2. – С. 1-10.
2. Arnold V.I.- Geometrical methods in the theory of ordinary differential equations // Springer-Verlag, New York, 1983.
3. Courant R., D. Gilbert, - Methods of Mathematical Physics. I,II. Partial Differential Equations //New York, Interscience, 1953, 1962.
4. Davydov A.A., Qualitative Theory of Control Systems. Mathematical Monographs, vol. 141. AMS, Providence, Rhode Island, 1994.
5. Ильяшенко Ю. С. Конечно-гладкие нормальные формы локальных семейств диффеоморфизмов и векторных полей / Ю. С. Ильяшенко, С. Ю Яковенко // Успехи метаматематические наук, 1991. - Т. 46, вып. 1(277). С. 3-39.

Научное издание

ТРУДЫ ВЛАДИМИРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

Выпуск 7

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНДУСТРИИ НАНОСИСТЕМ
И МАТЕРИАЛОВ

Подписано в печать 22.12.10.

Формат 60x84/8. Усл. печ. л. 15,81. Тираж 150 экз.

Заказ

Издательство

Владимирского государственного университета.

600000, Владимир, ул. Горького, 87.