

Министерство образования и науки Российской Федерации
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
Кафедра общей и прикладной физики

ФИЗИКА

Методические указания
к инновационным
лабораторным работам
на базе лазерной установки
«Интерферометр Майкельсона»
и платформы NI ELVIS



Владимир 2011

УДК 53(07)

ББК 22.33

Ф48

Составители:

А. Ф. Галкин, В. В. Дорожков, Л. В. Фуров, В. Н. Конешов

Рецензент

Кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры физики и прикладной математики
Владимирского государственного университета

Д. В. Абрамов

Печатается по решению редакционного совета
Владимирского государственного университета

Физика : метод. указания к инновац. лаб. работам на базе ла-
Ф48 зер. установки «Интерферометр Майкельсона» и платформы NI EL-
VIS / Владим. гос. ун-т ; сост. : А. Ф. Галкин [и др.]. – Владимир :
Изд-во Владим. гос. ун-та, 2011. – 52 с.

Соответствуют требованиям государственных стандартов. Состоят из описания шести лабораторных работ нового поколения с широкими возможностями и компьютерным обеспечением.

Предназначены для студентов первого-второго курсов всех форм обучения и специальностей, изучающих физику.

Рекомендованы для формирования профессиональных компетенций в соответствии с ФГОС 3-го поколения.

Табл. 2. Ил. 26. Библиогр.: 6 назв.

УДК 53(07)

ББК 22.33

ВВЕДЕНИЕ

Неотъемлемая часть современного физического практикума – компьютеризация эксперимента. Сочетание выполнения лабораторных работ с помощью реальных приборов и виртуального компьютеризированного оборудования, а также обработка результатов на компьютере формируют у студентов навык современного специалиста.

Лабораторное оборудование нового поколения включает в себя лазерную установку «Интерферометр Майкельсона» и учебную лабораторию NI ELVIS (National Instruments Educational Laboratory Virtual Instruments Suite). Наличие съёмной платы в NI ELVIS позволяет создавать различные электрические цепи и комбинировать схемотехнические решения в зависимости от конкретной лабораторной работы.

Эти установки с широкими возможностями, компьютерным обеспечением, служат инструментом для повышения качества образования сту-

дентов, особенно с физической направленностью.

Платформа NI ELVIS может использоваться как для учебных курсов, так и для проведения научных исследований. Поскольку установки достаточно сложны, категорически необходимо присутствие и контроль преподавателя, а также неукоснительное выполнение правил техники безопасности.

Используемые установки – точные и дорогие инструменты и выполнять работы с их помощью следует тщательно и аккуратно.

В приложении помещена лабораторная работа с использованием оборудования «малая оптическая скамья».

Лабораторная работа № 5 – 15*

ЮСТИРОВКА ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ МАЙКЕЛЬСОНА

Цель работы: получение двух совпадающих лазерных лучей и картины интерференционных полос в плоскости светочувствительной матрицы видеокамеры.

Оборудование: интерферометр Майкельсона.

Краткие теоретические сведения

Юстировка (*от лат. justus – правильный*) – совокупность операций по приведению средств измерений в состояние, обеспечивающее их правильное функционирование. Юстировка оптических систем заключается главным образом в регулировании взаимного расположения оптических деталей (линз, призм, зеркал) с целью их центрирования и обеспечения высокого качества изображения. Оптическую систему называют центрированной, если центры всех поверхностей лежат на одной прямой, которую называют главной оптической осью системы. В оптических системах предусматриваются устройства (рейтеры, винты, зажимы и т.д.), регулирующие положение оптических деталей и их закрепление.

Два световых пучка, складываясь, могут образовывать темноту! Это удивительное явление, открытое Юнгом в 1801 г., получило название интерференции света. Объяснить интерференцию удастся только на основе представления о свете как о волне. Так, задолго до открытия электромагнитной природы света было установлено, что свет представляет собой волну.

*Нумерация здесь и далее приводится в соответствии со сложившейся на кафедре традицией.

Способность интерферировать называют *когерентностью* света. Однако не всякий свет – когерентный. Например, свет лазера когерентен, а свет Солнца – нет. С точки зрения структуры света, когерентность – это близость света к идеальной гармонической волне.

Дифракция – это огибание световой волной препятствия, находящегося на ее пути. Одно из проявлений дифракции – так называемое «пятно Пуассона» – светлая точка в центре области геометрической тени, наблюдаемая при освещении непрозрачного диска когерентной световой волной. Другой пример – дифракция лазерного луча на дифракционной решетке (системе щелей в непрозрачном экране), когда прошедший свет образует яркий «веер» лучей, распространяющихся в различных направлениях.

Интерференция, дифракция, когерентность света чрезвычайно важны в таких процессах как передача оптической энергии на расстояние, концентрация светового поля в пространстве, формирование оптического изображения. На основе интерференции работают оптические приборы, позволяющие анализировать спектральный состав света – дифракционные решетки и многолучевые интерферометры. Эти же приборы очень точно измеряют длину световой волны. Дифракция рентгеновских лучей помогает исследовать структуру кристаллов и сложных молекул.

Ясное понимание физики интерференции и дифракции света позволило реализовать новый способ записи световых полей – голографию. Принципиальное отличие этого способа от фотографической регистрации состоит в том, что записывается не само световое поле, отраженное объектом, а картина интерференции этого поля с когерентной опорной световой волной. При этом удается сохранить информацию не только о пространственном распределении интенсивности света, но и о распределении фазы колебаний в световом поле. Практическая голография стала возможной после создания источника когерентного оптического излучения – лазера.

Интерференционные явления в оптике

Если при наложении двух световых пучков интенсивность света на экране оказывается не равной сумме интенсивностей, а периодиче-

ски меняется от точки к точке, образуя систему темных и светлых линий, то говорят, что имеет место интерференция света.

Принцип наблюдения интерференции иллюстрирует рис. 1. Два однородных световых пучка сводятся на экране и образуют систему темных и светлых линий – интерференционную картину. Подобный опыт можно осуществить, используя пучки лазерного света. Опыт показывает, что в пределах темных полос на экране два световых пучка практически полностью гасят друг друга. Коротко, интерференцию света можно определить как явление, в котором свет + свет = темнота.

Интерференция света – весьма тонкое физическое явление, которое редко наблюдается в обыденной жизни. Так, из опыта хорошо известно, что если комната освещается двумя лампочками, то освещенность в любой точке равна сумме освещенностей, создаваемых каждой лампочкой отдельно. Этот экспериментальный факт, который можно назвать законом сложения интенсивностей, имеет место для независимых источников света (ламп, свечей и т. п.). Оказывается, однако, что возможны ситуации, когда закон сложения интенсивностей нарушается. Так бывает, если накладываются пучки света, исходящие из одного и того же источника, но прошедшие разные оптические пути. Опыт показывает, что при определенных условиях наложение таких пучков дает распределение интенсивности света в виде чередующихся темных и светлых полос – так называемую интерференционную картину.

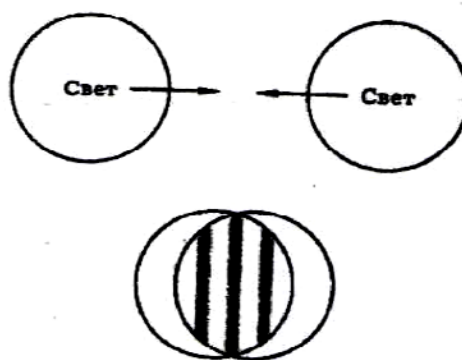


Рис. 1. Явление интерференции света. При наложении двух однородных световых пучков образуется картина чередования темных и светлых линий – интерференционная картина

Интерференция как волновое явление

Если допустить, что свет представляет собой *волну*, то явление интерференции легко объяснить. В самом деле, когда складываются две одинаковые сферические волны, в некоторых точках пространст-

ва колебания усиливают друг друга, в то время как в других точках, напротив, колебания взаимно гасятся. Это легко наблюдать в опыте с

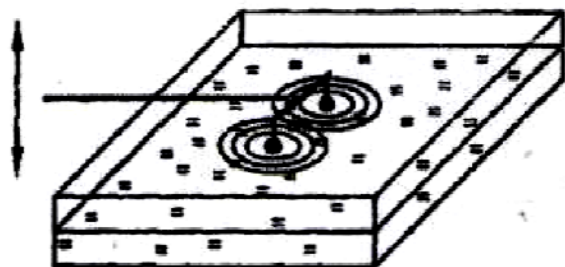


Рис. 2. Наблюдение интерференции волн на поверхности воды

волнами на поверхности жидкости (рис. 2). В плоскую стеклянную кювету налита вода. С помощью специального вибратора два вертикальных стержня с шариками на концах периодически касаются поверхности воды, возбуждая волны. Наложение волн дает интерференционную картину, которую можно наблюдать на

экране, используя просвечивающую кювету стробоскопическое освещение, синхронизованное с колебаниями вибратора.

Опыт Юнга

Можно ли наблюдать интерференцию в оптике? Положительный ответ на этот вопрос был получен в опыте Юнга (1801 г.). Схема опыта показана на рис. 3, а. В этом опыте свет от источника S проходил через маленькое отверстие в экране Q_1 , затем падал на экран Q_2 с двумя маленькими отверстиями, разнесенными на некоторое расстояние. Прошедший через отверстия свет падал на экран Q_3 , где и наблюдалась интерференционная картина.

Как видим, схема опыта Юнга очень похожа на схему наблюдения интерференции волн на поверхности воды. Если свет, испускаемый отверстиями в экране Q_2 , представляет собой волны, то на экране Q_3 должно наблюдаться чередование темных и светлых полос, т. е. интерференционная картина.

Опыт подтвердил это предположение. Сначала Юнг пропустил солнечные лучи в темное помещение и на их пути расположил два экрана: темный с двумя точечными отверстиями и белый (на некотором расстоянии позади первого). По обе стороны от яркой линии на белом экране он увидел две темноватые полосы, что привело к решению повторить опыт. На этот раз в качестве источника света он использо-

вал спиртовую горелку, добавив в ее пламя небольшое количество поваренной соли для получения яркого желтого излучения натрия. На экране возникла картина из регулярно расположенных темных полос (рис. 3, б).

Опыт Юнга явился первым убедительным доказательством того, что наложение света может образовать темноту. Наблюдение интерференции в опыте Юнга послужило экспериментальным доказательством волновой природы света.

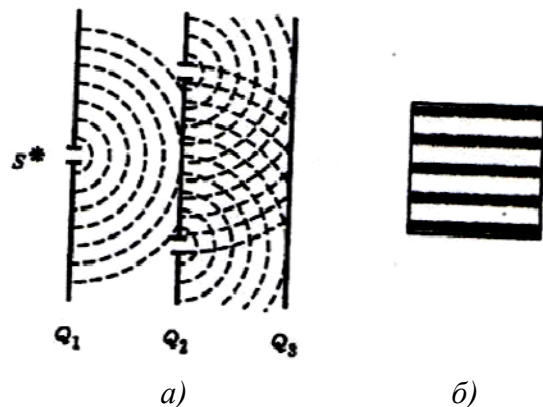


Рис. 3. Опыт Юнга. Схема опыта (а), фрагмент наблюдаемой интерференционной картины (б)

Задачи теории интерференции

Теория интерференции должна, с одной стороны, дать детальное описание результатов опыта Юнга и других интерференционных опытов, а с другой стороны, объяснить, почему при наложении пучков света от независимых источников интерференция не наблюдается, а имеет место закон сложения интенсивностей. Забегая вперед, укажем, что последнее связано со сложной, случайной структурой светового поля, создаваемого обычными (нелазерными) источниками света. Свет таких источников образуется в результате наложения огромного числа элементарных сферических волн, испускаемых независимыми осцилляторами (атомами) и вследствие этого сильно отличается по своей структуре от идеальной гармонической волны. Поэтому в теории интерференции будем использовать представление о случайном световом поле и методы статистического описания световых полей. Развивая теорию интерференции, придем к важному понятию когерентности света.

Когерентность света

Исторически понятие когерентности света возникло в связи с интерференционными опытами. Было выяснено, что появление интерференционной картины в опыте Юнга зависит от того, какой свет

падает на экран Q_2 с двумя точечными отверстиями. Если это свет точечного источника, каковым является маленькое отверстие в экране Q_1 (см. рис. 3), то интерференция есть. Если же это свет от протяженного источника или свет, рассеянный матовой пластинкой, то интерференции нет. Когерентностью и была названа способность света давать интерференционную картину.

Ясно, что когерентность связана со структурой света. Ниже увидим, что когерентный свет – это свет, структура которого близка к плоской или сферической гармонической волне. Иначе говоря, это свет с высоко упорядоченной структурой. В противоположность этому некогерентный свет, т.е. свет, не способный давать интерференцию и подчиняющийся закону сложения интенсивностей, имеет структуру хаотически модулированной волны.

Интерферометр Майкельсона

В конце XIX в. американский физик Альберт Майкельсон выполнил серию важных оптических экспериментов. Наиболее известны его опыты по измерению скорости света, а также опыты по интерференции света, проведенные на специально созданном приборе, получившем позднее его имя. На интерферометре Майкельсона был проведен знаменитый опыт, показавший, что скорость света относительно поверхности земли одинакова в направлении движения Земли по ее орбите и в перпендикулярном направлении. Убедительность и высокая точность экспериментальных результатов Майкельсона позволили установить важный физический принцип – принцип постоянства скорости света, согласно которому скорость света одинакова во всех направлениях и не зависит от движения источника. На основании этого принципа Альберт Эйнштейн создал теорию относительности.

Схема интерферометра Майкельсона показана на рис. 4. Интерферометр работает следующим образом. Пучок света от монохроматического источника направляется на светоделительную пластину, где делится на два пучка – прошедший и отраженный – примерно одинаковой интенсивности. Пройдя некоторые расстояния, эти пучки попадают на зеркала, отражаются ими в обратных направлениях и вновь падают на делительную пластину. Пластина снова

частично отражает и частично пропускает свет, в результате чего образуется пучок света, представляющий собой смесь пучков, прошедших через разные плечи интерферометра. Этот пучок света наблюдается на экране. Двигая одно из зеркал интерферометра в направлении падающего на него светового пучка, можно изменять оптическую разность хода лучей и наблюдать изменение интерференционной картины.

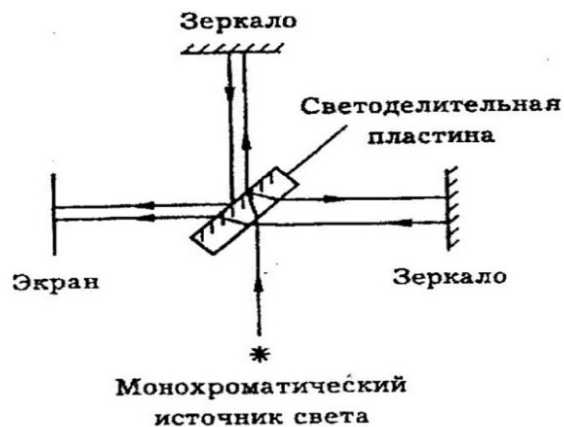


Рис. 4. Схема интерферометра Майкельсона

Светоделительная пластина представляет собой плоскопараллельную стеклянную пластину, покрытую с тыльной стороны тонкой пленкой серебра. Пленка серебра настолько тонка, что она частично отражает и частично пропускает свет. Таким образом, пластина играет роль полупрозрачного зеркала.

Интерференция монохроматических волн

Пусть источник света направляет в интерферометр Майкельсона плоскую монохроматическую световую волну вида:

$$E_0 = A_0 \cos(\omega t - kz). \quad (1)$$

Обозначим через R и T коэффициенты отражения и пропускания света (по интенсивности) делительной пластинкой. Пренебрегая поглощением света в пластинке, можно записать

$$R + T = 1. \quad (2)$$

Так как амплитуда A плоской монохроматической волны связана с ее интенсивностью I формулой

$$I = \frac{cA^2}{8\pi}, \quad (3)$$

коэффициенты отражения и пропускания света делительной пластинкой по амплитуде световой волны будут равны, соответственно, \sqrt{R} и \sqrt{T} .

На пути от источника света до плоскости наблюдения световая волна делится на две волны, причем каждая из этих двух волн по одному разу пропускается и по одному разу отражается делительной пластинкой. В итоге на выходе интерферометра образуется световая волна вида

$$E = \sqrt{RT} A_0 [\cos(\omega t - kl_1) + \cos(\omega t - kl_2)], \quad (4)$$

где l_1 и l_2 – длины плеч интерферометра,

$$\text{или } E = A \cos(\omega t - kl), \quad (5)$$

где

$$A = \sqrt{RT} A_0 \cos(\delta/2), \quad l = (l_1 + l_2)/2. \quad (6)$$

Величина δ имеет смысл разности фаз волн, прошедших разные плечи интерферометра:

$$\delta = k\Delta, \quad \Delta = l_1 - l_2, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (7)$$

Полагая

$$R = T = 1/2,$$

и используя формулы (2) – (6), интенсивность света в плоскости наблюдения можно представить в виде

$$I = \frac{1}{2} I_0 (1 + \cos\delta), \quad (8)$$

где $I_0 = cA_0^2/8\pi$ – интенсивность световой волны на входе интерферометра.

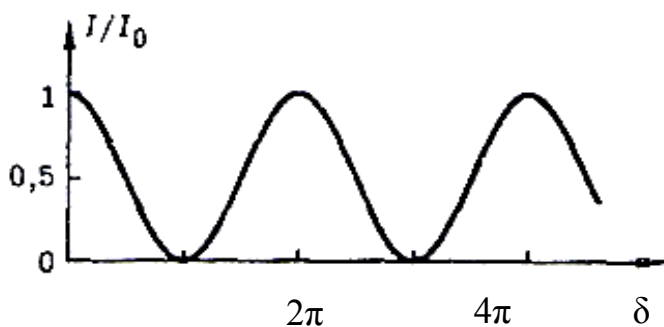


Рис. 5. Пропускание интерферометра Майкельсона в зависимости от разности фаз интерферирующих волн

Если одно из зеркал интерферометра Майкельсона, установленное на салазках, смещается на расстояние Δz , то разность хода лучей, изменяется на $\Delta = 2\Delta z$, а разность фаз δ – на $2\pi\Delta/\lambda$. На рис. 5 показана зависимость интенсивности света

I на экране наблюдения от δ для случая падающей плоской монохроматической волны.

Из рисунка видно, что в максимуме при

$$\delta = 2m\pi, \quad m = 1, 2, 3 \dots \quad (9)$$

интенсивность прошедшего света I становится равной интенсивности падающего света I_0 . Иначе говоря, при условии (9) интерферометр Майкельсона полностью пропускает падающую на него плоскую монохроматическую световую волну. Напротив, в минимуме при

$$\delta = (2m + 1)\pi, m = 1, 2, 3 \dots \quad (10)$$

интенсивность прошедшего света оказывается равной нулю. Это означает, что падающая плоская волна полностью отражается назад в источник.

Отсюда следует, что интерферометр Майкельсона может служить фильтром, пропускание которого зависит от длины волны, или селективным по длинам волн отражателем света. В этой последней роли он часто используется для селекции мод в лазерах.

В случае расходящегося падающего излучения разность хода двух волн зависит от угла падения (рис. 6, а). В этом случае на экране наблюдения возникает интерференционная картина, состоящая из чередующихся темных и светлых колец, concentрических с осью симметрии системы (рис. 6, б). Смещение какого-либо из зеркал приводит к изменению диаметра колец.

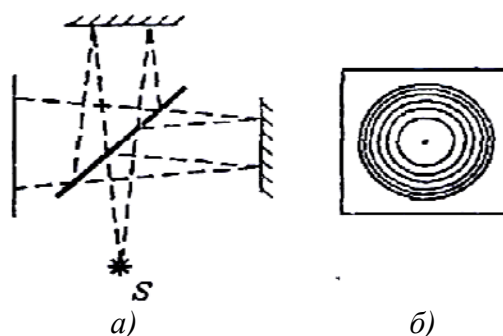


Рис. 6. Картина колец, образующаяся в интерферометре Майкельсона при расходящемся падающем излучении

В случае параллельного падающего пучка света, но слегка наклоненных зеркал интерферометра или делительной пластинки интерференционная картина состоит из параллельных полос, которые сдвигаются в перпендикулярном направлении при изменении разности хода лучей Δ .

Интерферометр Майкельсона можно использовать для абсолютного измерения длин световых волн. Для этого нужно подсчитать число N максимумов, возникающих на экране наблюдения при смещении подвижного зеркала интерферометра на известное расстояние Δz . Тогда длина волны

$$\lambda = 2\Delta z/N. \quad (11)$$

Эта техника использовалась для очень точных измерений длин волн излучения лазеров.

Референтная плоскость

На рис. 1.7, *а* показана упрощенная схема интерферометра Майкельсона, а на рис. 7, *б* – эквивалентная схема, в которой вместо зеркала M_1 введена так называемая «референтная плоскость», занимающая место изображения зеркала M_1 в делительной пластинке.

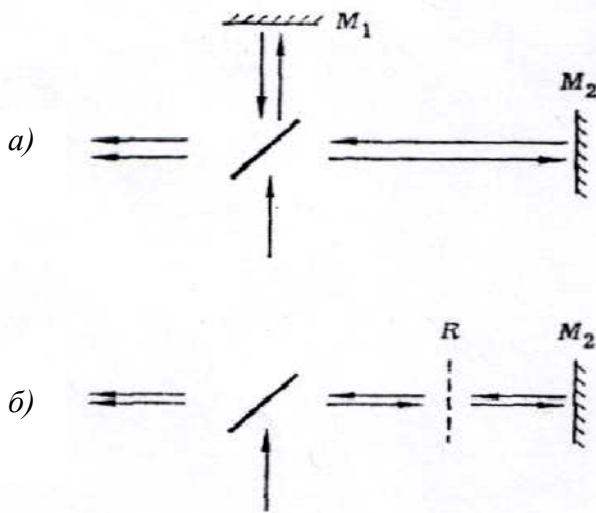


Рис. 7. Интерферометр Майкельсона (*а*) и его эквивалентная схема (*б*). Пунктиром показано положение референтной плоскости

Из рис. 7, *б* видно, что для анализа работы интерферометра Майкельсона достаточно рассмотреть интерференцию волн, отраженных референтной плоскостью R и зеркалом M_2 . Иначе говоря, возникает задача об интерференции волн, отраженных гранями плоскопараллельной пластинки.

Иначе говоря, возникает задача об интерференции волн, отраженных гранями плоскопараллельной пластинки.

Полосы равного наклона

Пусть плоская монохроматическая световая волна падает на плоскопараллельную пластинку, обе грани которой частично отражают свет (рис. 8). Подсчитаем оптическую разность хода лучей Δ , отраженных передней и задней гранями пластинки.

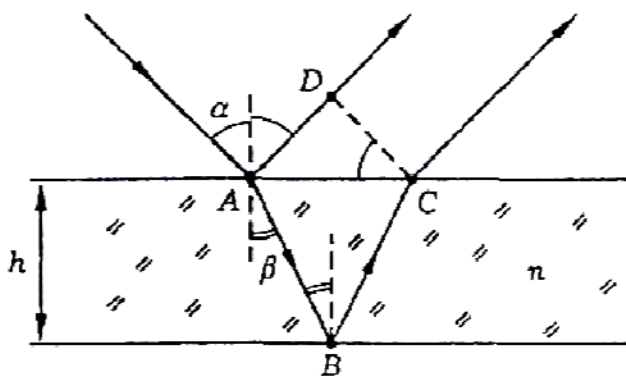


Рис. 8. Интерференция света на плоскопараллельной пластинке

Обозначим толщину пластинки h , угол падения света α , угол преломления β , показатель преломления материала пластинки n . В силу закона Снеллиуса

Обозначим толщину пластинки h , угол падения света α , угол преломления β , показатель преломления материала пластинки n . В силу закона Снеллиуса

$$\sin \alpha = n \sin \beta. \quad (12)$$

Так как фазовый набег световой волны в среде пропорционален показателю преломления n , искомая разность хода лучей

$$\Delta = 2ABn - AD. \quad (13)$$

Из рис. 8 видно, что:

$$AD = AC \sin\alpha, AC = 2AB \sin\beta, AB = \frac{h}{\cos\beta} \quad (14)$$

Из (12) – (14) получаем

$$\Delta = 2hn \cos \beta. \quad (15)$$

Формулы (12), (15) показывают, что разность хода лучей, отраженных гранями плоскопараллельной пластинки, зависит от угла падения света на пластинку («угла наклона»). Поэтому при падении на пластинку расходящегося светового пучка образуется интерференционная картина, называемая «полосы равного наклона». В частности, в случае осесимметричного лазерного пучка интерференционная картина имеет вид системы концентрических колец. Эту картину можно наблюдать с помощью интерферометра Майкельсона, используя в качестве источника света гелий-неоновый лазер (см. рис. 6).

Полосы равной толщины

Если одно из зеркал в интерферометре Майкельсона (см. рис. 7, а) слегка отклонено так, что плоскости зеркал M_1 и M_2 не взаимно перпендикулярны, то референтная плоскость R (напомним, это плоскость, занимающая место изображения зеркала M_1 в делительной пластине) и зеркало M_2 будут не параллельны друг другу, образуя как бы грани клиновидной пластинки.

Картина отражения параллельных световых лучей от граней клина показана на рис. 9. Разность хода лучей в этом случае приближенно описывается той же формулой (15), где h – толщина пластинки в том месте, где происходит отражение света. Так как величина h меняется вдоль клиновидной пластинки, получающаяся интерференционная картина получила название «полосы равной толщины».

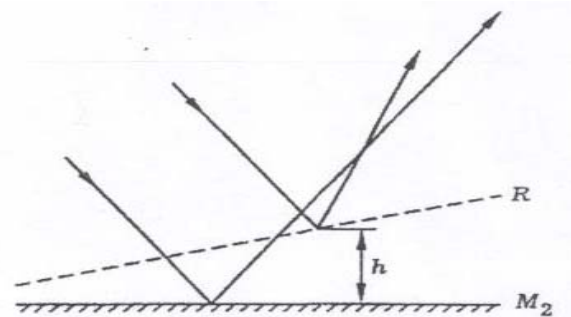


Рис. 9. Интерференция света на клине

Экспериментальная установка

Описание установки и назначение элементов

Оптическая схема экспериментальной установки представлена на рис. 10.

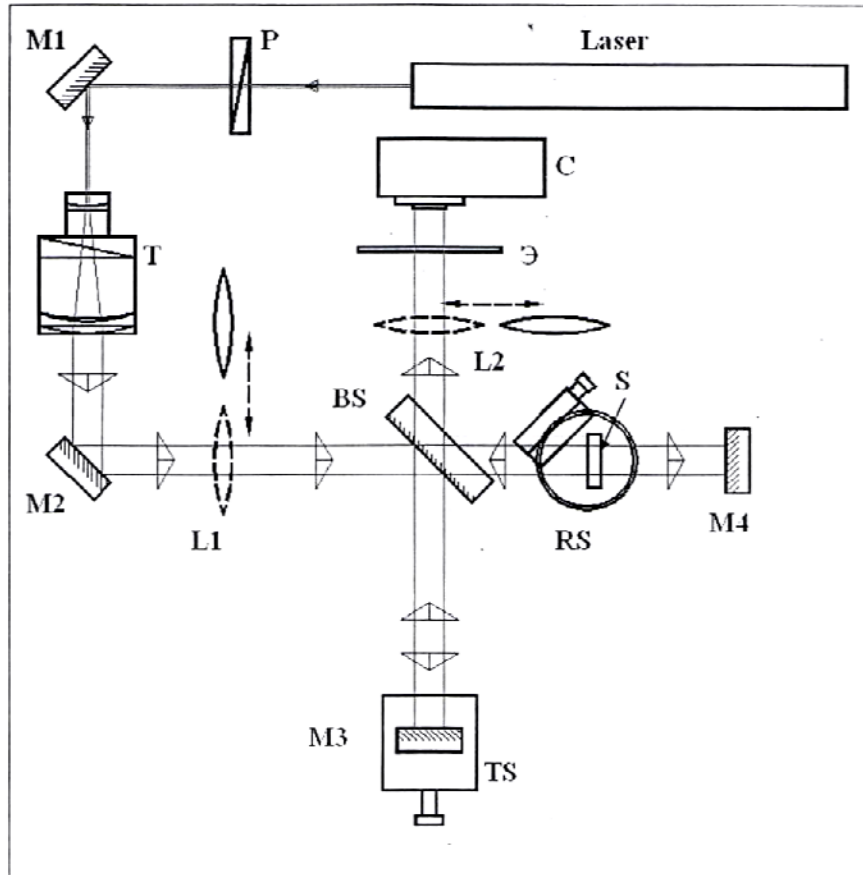


Рис. 10. Схема экспериментальной установки
«Интерферометр Майкельсона»

На оптическом столе установлены следующие элементы и устройства:

- одномодовый He-Ne лазер (Laser) – источник линейно поляризованного светового излучения, работающий на длине волны 632,8 нм;
- поляризационная пластина, установленная во вращающейся оправе (**P**) – используется для ослабления лазерного излучения;
- поворотное зеркало **M1**;
- телескоп (T) – служит для расширения исходного пучка He - Ne лазера и формирования плоского волнового фронта;

- поворотное зеркало **M2**;
- линза **L1** используется для преобразования плоского волнового фронта лазерного пучка в сферический. Этот элемент можно вводить в оптическую схему при необходимости;
- делительная пластина **BS** – полупрозрачная пластина с примерно 50% отражением на длине волны используемого лазера;
- зеркало **M3**, расположенное на линейном трансляторе **TS**;
- поворотный столик **RS** с возможностью установки плоскопараллельной пластинки;
- зеркало **M4**, жестко закрепленное на оптической плите;
- линза **L2** используется для фокусировки (при необходимости) интерференционной картины на площадку ПЗС камеры;
- ПЗС камера **C** служит для фиксации изображения интерференционной картины и ввода данных в персональный компьютер;
- экран **Э** служит для визуального наблюдения интерференционной картины.

Все зеркала и делительная пластина, установленные на оптической плите, имеют возможность подстройки по углу, что необходимо для юстировки интерферометра.

При выведенной из оптического пути линзы **L1** на экране **Э** (и соответственно на ПЗС камере при отсутствии масштабирующей линзы **L2**) будет наблюдаться интерференция двух пучков, имеющих плоские волновые фронты.

При введении линзы **L1** в оптический путь интерферометра (рис. 11) будет наблюдаться интерференция двух пучков со сферическими волновыми фронтами.

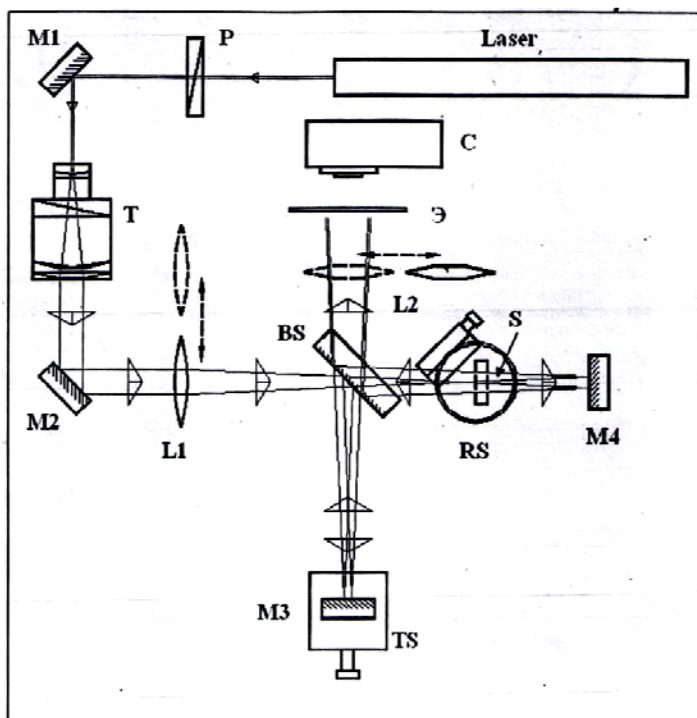


Рис. 11. Схема экспериментальной установки «Интерферометр Майкельсона». При введении линзы **L1** на экране **Э** наблюдается интерференция двух сферических фронтов

Правила безопасности при работе на установке

1. Учебная лазерная установка «Интерферометр Майкельсона» предназначена для изучения явления интерференции когерентных лазерных пучков с использованием гелий-неонового лазера с длиной волны $\lambda = 0.6328$ мкм и мощностью излучения ~ 1 мВт.
2. При работе на установке руководствоваться описанием задачи и рекомендациями преподавателя.
3. При работе на установке **ОПАСНЫМ** является попадание в глаз прямого и зеркально отраженного лазерного пучка. Наблюдение на экране рассеянного излучения безопасно для наблюдателя.
4. **ЗАПРЕЩАЕТСЯ** ставить на пути лазерного луча какие-либо отражающие поверхности за исключением тех, которые предусмотрены при выполнении лабораторной работы.
5. Порядок включения установки:
 - а) включить АВТОМАТ питания стенда (выполняется лаборантом);
 - б) далее – согласно описанию задачи;
 - в) порядок выключения – обратный.
6. **Действия в аварийной ситуации:** выключить автомат питания стенда, расположенный на учебной установке, сообщить об аварии сотруднику лаборатории и **ничего не трогать на установке.**

Порядок выполнения работы

Получение двух совпадающих лазерных лучей и получение картины интерференционных полос в плоскости светочувствительной матрицы видеокамеры.

1. Направление луча в интерферометр

С помощью зеркала М1 направьте луч He-Ne лазера параллельно опорной плите на высоте 67 мм. Добейтесь совпадения оптической оси телескопа с направлением распространения луча поворотом юстировочного винта зеркала М1 и вертикальным смещением телескопа.

С помощью поворотного зеркала М2 направьте луч на центр делительной пластины. Убедитесь в том, что луч распространяется горизонтально на расстояние 67 мм от опорной плиты.

Замечание: не допускайте попадание прямого лазерного излучения в глаза! Для определения положения луча используются экраны из белой бумаги.

2. Юстировка интерферометра

Юстировка зеркала М3: зеркало должно стоять строго перпендикулярно лучу, центр луча должен попадать в центр зеркала.

Юстировка делительной пластины: после отражения от пластины луч должен идти горизонтально. Угол между падающим и отраженным лучом должен составлять 90° .

Юстировка зеркала М4: зеркало должно стоять строго перпендикулярно лучу, центр луча должен попадать в центр зеркала.

После делительной пластины лучи от зеркал М3 и М4 должны совпадать и идти горизонтально на расстоянии 67 мм от поверхности опорной плиты. На экране Э перед камерой в области пересечения пятен от двух пучков наблюдается интерференционная картина. В случае необходимости уточните юстировку элементов.

Вставьте поляризатор в пучок между лазером и поворотным зеркалом М1. Уменьшите яркость интерференционной картины до уровня, слабо различимого глазом.

3. Настройка интерференционной картины на камере

Уберите экран и установите камеру таким образом, чтобы интерференционная картина наблюдалась на матрице ПЗС камеры.

Убедитесь, что камера N1-1742 работает (непрерывно горят светодиоды Power, Status) и подключена к компьютеру Ethernet кабелем. Запустите программу «Интерферометр Майкельсона».

В случае успешного соединения с камерой полученное изображение будет выводиться на экране в главном окне программы.

Перекройте лазерный луч на выходе из лазера, убедитесь, что изображение почти черное. В противном случае выключите лишний свет, затемните помещение.

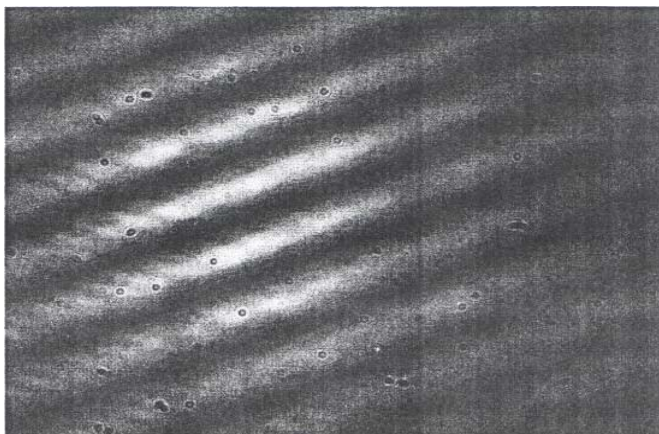


Рис. 12. Интенсивность излучения настроена правильно

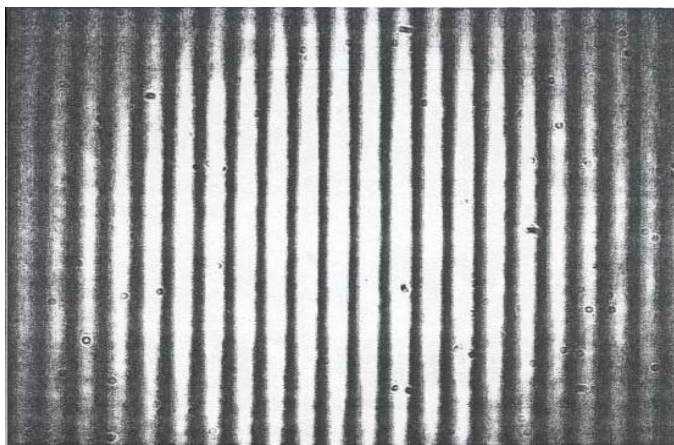


Рис. 13. Интенсивность излучения слишком высокая



Рис. 14. На экране помещается одна полоса интерференционной картины

Наблюдайте картину интерференционных полос на экране программы. В случае появления насыщения сигнала с камеры (лампочка «Насыщение сигнала» горит красным цветом) уменьшите интенсивность лазерного излучения поворотом поляризационного фильтра. На рис. 12 приведены примеры правильной и неправильной рис. 13 – настройки интенсивности лазерного излучения.

Наблюдайте изменение интерференционной картины при наклоне зеркал. Добейтесь точной юстировки зеркал, соответствующей строго параллельному ходу лучей обеих плеч интерферометра. При этом на экране должно наблюдаться менее двух полос интерференционной картины (рис. 14). Сохраните изображение в файл.

Результат: результат упражнения – файл с картиной интерференции лучей при точной юстировке зеркал.

Контрольные вопросы

1. В чем состоит явление интерференции?
2. Математическое описание интерференции монохроматических волн.
3. В чем состоит временная и пространственная когерентности?
4. Что такое время, длина и радиус когерентности?
5. Как образуются полосы равного наклона?
6. Как образуются полосы равной толщины?
7. В чем состоит принцип работы интерферометра Майкельсона? Нарисуйте схему интерферометра Майкельсона.
8. Каково применение каждого элемента на схеме рис. 10?
9. В чем состоит процесс юстировки элементов интерферометра Майкельсона?
10. Какова интерференционная картина при расходящемся падающем излучении?
11. Каковы правила техники безопасности при работе на интерферометре Майкельсона?

Лабораторная работа № 5 – 16

ИЗМЕРЕНИЕ УГЛОВ СХОЖДЕНИЯ ЛУЧЕЙ В ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ МАЙКЕЛЬСОНА

Цель работы: измерение относительных углов наклона плоских волновых фронтов лучей из разных плеч интерферометра Майкельсона.



Оборудование: интерферометр Майкельсона.

Краткие теоретические сведения изложены в лабораторной работе №5 – 15

Порядок выполнения работы

1. Наблюдайте изменение интерференционной картины при вращении винтов юстировки наклона одного из зеркал М3 или М4.
2. Измерьте углы схождения лучей при различных положениях юстировочных винтов.
3. Измерьте видность интерференционной картины в различных точках. Измерения в этом упражнении проводятся в ручном режиме.

Измерения

Получите желаемую стабильную интерференционную картину. Выберите инструмент рисования линии ( - инструмент не выбран,  - инструмент выбран) и проведите линию перпендикулярно интерференционным полосам.

Внимание! Линия не должна выходить за границы экрана. В противном случае полученные значения будут неверными.

Пример профиля интенсивности

В разделе «Ручные измерения» нажмите кнопку «Показать профиль» (рис. 1). Откроется окно с профилем интенсивности вдоль выбранной линии. В этом окне вы имеете возможность перемещать оба курсора с помощью мыши. При перемещении курсоров в текстовых индикаторах справа отображается значение интенсивности и положения. Также отображается длина линии и угол ее наклона.

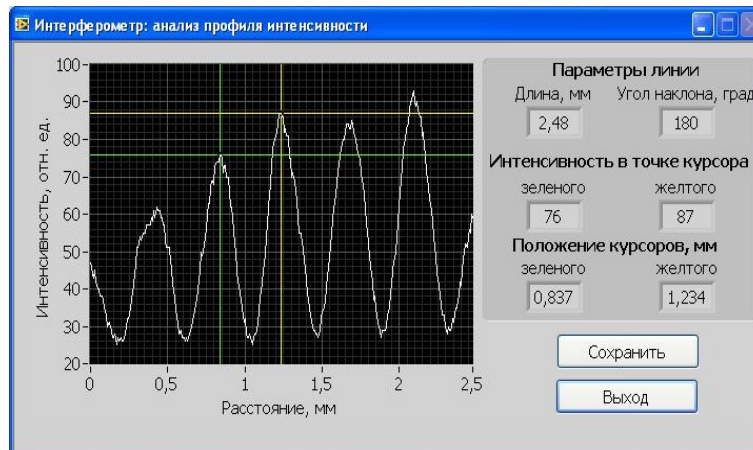


Рис. 1. Профиль интенсивности

Установите курсоры в точки соседних максимальных и минимальных значений интенсивности. Рассчитайте значение видности интерференционной картины в этой точке по формуле

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

Расчет углов схождения по вертикали и горизонтали

Рассчитайте углы схождения по вертикали и горизонтали по формулам

$$\varphi_{\text{вер}} = \varphi \cdot \sin(\theta); \quad \varphi_{\text{гор}} = \varphi \cdot \cos(\theta),$$

где θ – угол между перпендикуляром к полосам и горизонталью;

$$\varphi = \frac{\lambda}{2l},$$

где λ – длина волны излучения, l – расстояние между соседними интерференционными полосами. Для гелий-неонового лазера $\lambda = 0,6328$ мкм.

Чтобы узнать расстояние между двумя интерференционными полосами l , во вкладке «анализ профиля интенсивности» выбираем два соседних максимума интерференционной картины. На рис. 1 даны параметры линии, полученные методом, описанным в данной лабораторной работе. Получилась длина l : $1,234 - 0,837 = 0,397$ мм.

θ – угол между перпендикуляром к полосам и горизонталью, в нашем случае равен 180 градусам.

Далее расчет углов схождения проводится по приведённым выше формулам.

Сохраните анализируемый профиль интенсивности в текстовый файл (кнопка сохранить).

Результат: результат работы – интерференционные картины при различных углах поворота зеркал (рис. 2 – 4): горизонтальное схождение лучей, вертикальное схождение лучей. Также в результатах должны быть представлены профиль интенсивности, значения углов схождения лучей по горизонтали и вертикали и значения видности в различных точках интерференционной картины.

Примеры интерференционных картин

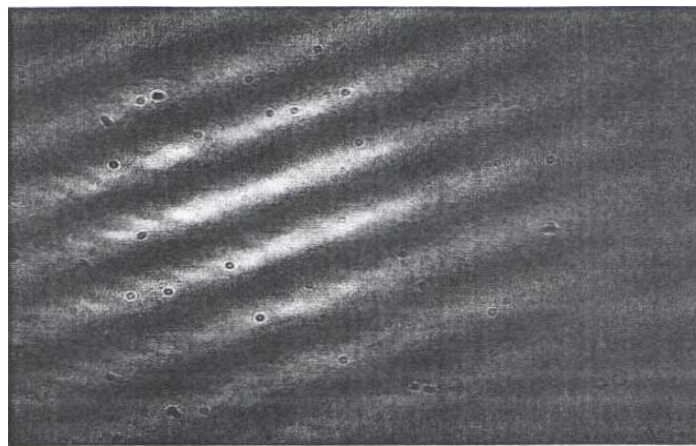


Рис. 2. Лучи расходятся как по вертикали, так и по горизонтали

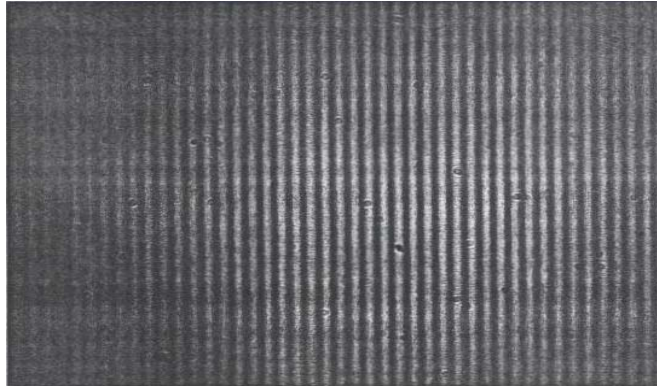


Рис. 3. Лучи сходятся в горизонтальной плоскости, угол схождения большой

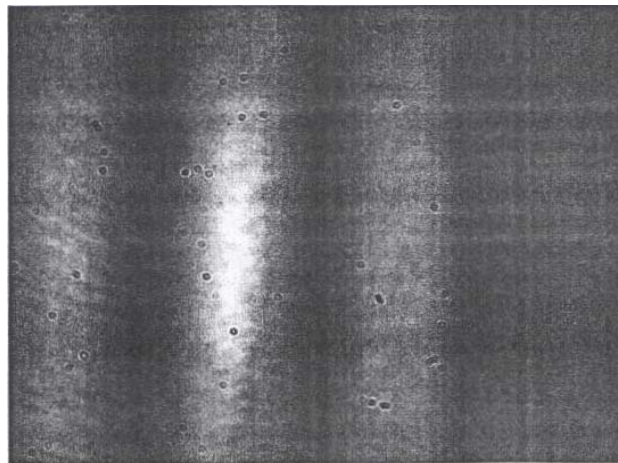


Рис. 4. Лучи сходятся в горизонтальной плоскости, угол схождения меньше

Контрольные вопросы

1. Что доказал Альберт Майкельсон своим экспериментом?
2. Что такое когерентность?
3. Опишите опыт Юнга.
4. Что опыт Юнга доказывает?
5. Как изменяется интерференционная картина при вращении винтов юстировки?
6. Как измерить углы схождения лучей при различных положениях юстировочных винтов?
7. Как изменяется видность интерференционной картины в различных точках?

Лабораторная работа № 5 – 17

НАБЛЮДЕНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ СФЕРИЧЕСКИХ ВОЛНОВЫХ ФРОНТОВ

Цель работы: получить интерференционные полосы в случае интерференции сферических волн.

Оборудование: интерферометр Майкельсона.

Теоретические сведения

Интерференция света – пространственное перераспределение энергии светового излучения при наложении двух или нескольких световых волн, частный случай общего явления интерференции волн. Некоторые явления интерференции света исследовались ещё И. Ньютоном в XVII в., но не могли быть им объяснены с точки зрения его корпускулярной теории. Правильное объяснение интерференции света как типично волнового явления было дано в начале XIX в. Т. Юнгом и О. Френелем. Наиболее широко известна интерференция света, характеризующаяся образованием стационарной интерференционной картины – регулярного чередования в пространстве областей с повышенной и пониженной интенсивностью света, получающейся в результате наложения когерентных световых пучков, т. е. в условиях постоянной разности фаз.

Стационарная интерференция света возникает при наличии когерентности (определённой корреляции фаз) налагающихся волн. Взаимно когерентные световые пучки могут быть получены путём разделения и последующего сведения лучей, исходящих от общего источника света. При этом требование когерентности налагает неко-

торые ограничения на угловые размеры источника и на ширину спектра излучения.

Образование интерференционной картины удобно проследить на идеализированной схеме классического эксперимента Юнга (рис.1).

Точечный источник света S с длиной волны λ освещает два малых отверстия в экране A , которые становятся вторичными взаимно когерентными источниками света за счёт явления дифракции света. На экране B наблюдается интерференционная картина, названная интерференцией двух созданных систем волн. В соответствии с принципом суперпозиции напряжённость электрического поля E_Q в произвольной точке Q экрана

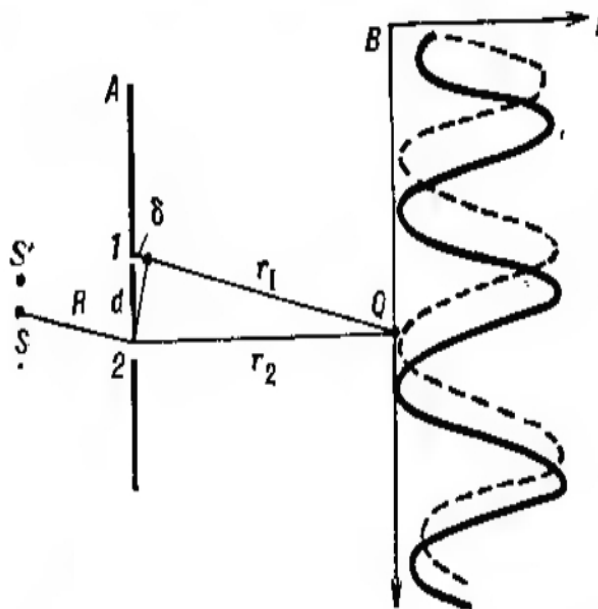


Рис. 1. Схема опыта Юнга

В даётся суммой напряжённостей полей E_{1Q} и E_{2Q} , созданных в точке Q источниками 1 и 2. Наблюдаемая величина – интенсивность излучения, падающего на экран, пропорциональна среднему квадрату напряжённости поля. Представляя напряжённость поля $E_i(t,s)$ каждого источника ($i = 1, 2$) гармонической функцией времени t и расстояния s вдоль направления распространения, получим

$$E_i(t, s) = E_i \cos 2\pi \left(vt + \frac{s}{\lambda} + \varphi_0 \right), \quad (1)$$

где λ – длина волны, ν – частота, φ_0 – начальная фаза световых колебаний.

Можно при надлежащем выборе единиц измерения напряжённости поля получить выражение для интенсивности I_Q в точке Q в виде

$$I_Q = \langle [E_{1Q}(t, s) + E_{2Q}(t, s)]^2 \rangle = I_2 + I_1 + 2\sqrt{I_1 \cdot I_2} \cdot \cos 2\pi \frac{\delta + \delta_0}{\lambda}. \quad (2)$$

Здесь $I_1 = \langle E_{1Q}^2 \rangle$ и $I_2 = \langle E_{2Q}^2 \rangle$ – интенсивности света в точке Q , создаваемые каждым источником отдельно; δ – оптическая разность хода интерферирующих лучей: $\delta = n \cdot r_1 - n \cdot r_2$; r_1 и r_2 – расстояния от отверстий 1 и 2 до точки Q ; n_1 и n_2 – показатели преломления среды (в случае воздуха $n_1 = n_2 = 1$); δ_0 – оптическая разность хода лучей от источника S до точек 1 и 2.

Из (1) следует, что интенсивность света в данной точке экрана отличается от суммы интенсивностей $I_1 + I_2$, создаваемых источниками 1 и 2 при независимом освещении ими экрана. При совместном действии когерентных источников 1 и 2 истинная интенсивность оказывается отличающейся на величину, описываемую третьим, интерференционным членом формулы (1). Интерференция, разумеется, не меняет полной световой энергии, падающей на экран B , приводя лишь к её перераспределению с образованием характерной интерференционной картины. На экране B возникает система световых полос, интенсивность которых в сечении плоскостью, проходящей через источник и отверстия 1 и 2, изменяется, как показано графически сплошной линией на правой части рис. 1. Максимальная интенсивность в интерференционной картине наблюдается при разности хода, равной чётному числу полуволн.

В реальном опыте конечный размер источника света можно учесть, рассмотрев интерференционную картину от другого, чуть смещённого относительно S точечного источника S' , дающего смещённую интерференционную картину (пунктир). Сложение множества таких картин от всех точек источника приводит к смазыванию интерференционной картины, т. е. к падению её контраста. Суммарная интерференционная картина будет мало отличаться от идеальной (создаваемой точечным источником), если линейный размер источника ΔS удовлетворяет условию $\Delta S < \frac{\lambda \cdot R}{d}$ пространственной когерентности (d – расстояние между отверстиями 1 и 2, R – расстояние от источника до экрана A).

Конечная ширина $\Delta \lambda$ спектра излучения источника также служит причиной снижения контраста интерференционной картины, снижения тем больше, чем выше порядок интерференции μ , равный

целой части отношения $\frac{\delta}{\lambda}$. При освещении белым светом на экране видна белая центральная полоса нулевого порядка с примыкающими к ней быстро исчезающими радужными полосами. Окраска полос связана с тем, что положение максимумов интенсивности, имеющих порядок $\mu \neq 0$, зависит от длины волны. При квазимонохроматическом освещении ($\Delta\lambda \ll \bar{\lambda}$, где $\bar{\lambda}$ – средняя длина волны) наблюдается множество чётких полос, отвечающих порядку интерференции вплоть до $\mu \cong \frac{\bar{\lambda}}{\Delta\lambda}$.

Существует множество схем опытов и естественных ситуаций, в которых наблюдается интерференция. Их наиболее существенные различия связаны с различиями в способах получения когерентных пучков света и в числе интерферирующих лучей.

По способам создания когерентных пучков света выделяют схемы с делением волнового фронта и с делением амплитуды.

При первом способе сводятся вместе световые пучки, исходно различающиеся направлением распространения от источника света. Такой принцип используется, например, в эксперименте Юнга, а также в демонстрационных опытах с применением зеркал Френеля, билинзы Бийе и др. Из интерференционных устройств с делением волнового фронта большое практическое значение в спектроскопии имеет дифракционная решётка. Все схемы интерференции света с делением волнового фронта предъявляют жёсткие требования к малости углового размера источника света. Именно на резкой критичности контраста интерференционной картины к размеру источника в схемах с делением волнового фронта основан метод измерения угловых размеров звёзд с помощью звёздного интерферометра.

В схемах интерференции света амплитудным делением волнового поля излучение первичного источника делится полупрозрачными границами раздела оптических сред. Так, например, возникает широко распространённая в естественных условиях интерференция света в тонких плёнках, ответственная за радужное окрашивание масляных пятен на воде, мыльных пузырей, крыльев насекомых, окисных плёнок на металлах и др. Во всех этих случаях имеет место интерференция света, отражённого двумя поверхностями плёнок. В тонких плён-

ках переменной толщины при освещении протяжённым источником света картина интерференционных полос воспринимается локализованной на поверхности плёнки, причём данная интерференционная полоса соответствует фиксированной толщине плёнки. Яркое интерференционное окрашивание возникает только для весьма тонких плёнок толщиной порядка длины волны, т. е. в низких порядках интерференции. Для более толстых плёнок интерференционная картина видна при освещении монохроматическим светом, например в свете натриевой лампы низкого давления. В тонких плёнках строго постоянной толщины (с точностью до малых долей длины волны) одинаковую разность хода приобретают при отражении от двух поверхностей плёнки лучи, падающие на плёнку под фиксированным углом. Эти лучи в фокальной плоскости линзы образуют интерференционную картину полос равного наклона.

Метод деления амплитуды широко применяется в различных схемах интерферометров, в которых для разделения волновых полей используются специальные полупрозрачные зеркала. Для метода деления амплитуды характерно снижение ограничения на угловой размер источника света.

Описание рабочей установки

На схеме (рис. 2) представлены:

- одномодовый He-Ne лазер (LASER) – источник линейно-поляризованного светового излучения, работающий на длине волны 632,8 нм;
- поляризационная пластина, установленная во вращающейся оправе (Р) – используется для ослабления лазерного излучения.
- поворотное зеркало М1;
- телескоп (Т) – служит для расширения исходного пучка He-Ne лазера и формирования плоского волнового фронта;
- поворотное зеркало М2;
- линза L1 используется для преобразования плоского волнового фронта лазерного пучка в сферический. Этот элемент можно вводить в оптическую схему по необходимости;

- делительная пластина BS – полупрозрачная пластина с примерно 50% отражением на длине волны используемого лазера;
- зеркало M3, расположенное на линейном трансляторе TS;
- поворотный столик RS, с возможностью установки плоскопараллельной пластины;
- зеркало M4, жестко закрепленное на оптической плите;
- линза L2 используется для фокусировки (при необходимости) интерференционной картины на площадку ПЗС камеры;
- ПЗС камера C служит для фиксации изображения интерференционной картины и ввода данных в персональный компьютер;
- экран Э служит для визуального наблюдения интерференционной картины.

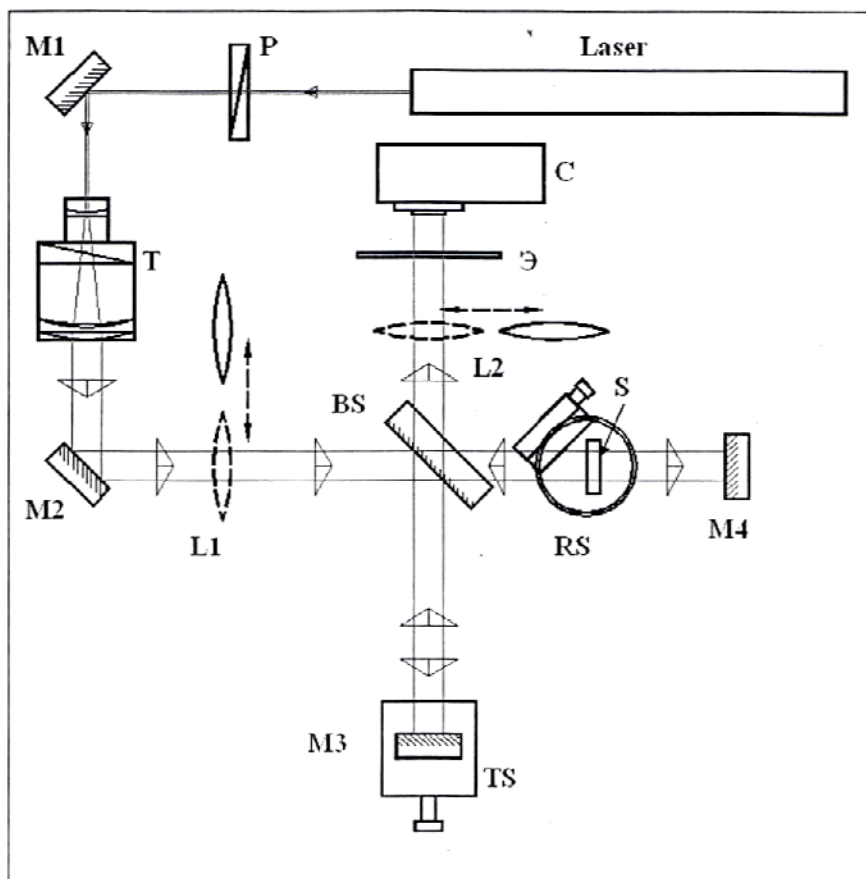


Рис. 2. Схема интерферометра Майкельсона

Если гашение интенсивности поляризатором недостаточно, то допускается установка дополнительных оптических приборов, на-

пример фильтра, для уменьшения интенсивности до необходимого значения либо до падения луча на светоделительную пластину, либо непосредственно перед попаданием луча на матрицу камеры.

Порядок выполнения работы

1. Включить компьютер и запустить приложение «Интерферометр».
2. Убедиться, что сигнал с камеры поступает в компьютер, для этого нужно снять защитный колпак. При этом вся рабочая область должна стать белого цвета.
3. Огородить рабочее место от света так, чтобы цвет рабочей области стал наиболее тусклым, близким к чёрному.
4. Закрыть матрицу камеры защитным колпаком.
5. Включить HE-NE лазер.
6. Убрать светофильтры с пути светового пучка и настроить поляризатор до максимальной интенсивности выходного пучка.
7. Если световые пучки не сходятся в центре объектива камеры, то отъюстировать зеркала M3 и M4 так, чтобы пучки лучей попадали точно в центр камеры.
8. Наблюдать интерференцию плоских волновых фронтов на экране Э.
9. Внести в оптический тракт линзы L1 и L2, причём сначала вносится линза L₁, а затем L₂.
10. При смещении лучей после внесения линз L1 и L2 настроить зеркала M3 и M4 таким образом, чтобы центры пучков совпадали с центром объектива камеры.
11. Наблюдать на экране Э интерференцию сферических волновых фронтов.
12. Внести в оптический тракт светофильтры и настроить поляризатор так, чтобы картина на экране Э была еле видна.
13. Снять защитный колпак с объектива камеры.
14. Настроить зеркала M3 и M4 так, чтобы в программе был отчётливо виден «Мальтийский крест».

15. Сдвигая зеркало M3 вдоль пучка из одного крайнего положения в другое, получить последовательно на экране кольца, несимметричный крест, симметричный крест, опять несимметричный крест и опять кольца. Сохранить соответствующие рисунки.

16. Вывести из луча сначала линзу L2, затем L1.

Правила техники безопасности при выполнении работы

1. Избегайте попадания прямого и отраженного лазерного луча в глаза.

2. Следите за тем, чтобы интенсивность луча, падающего на матрицу камеры, была минимальна.

3. При внесении в оптический тракт линз сначала вносится линза L1, а затем линза L2, а убираются в обратном порядке, так как сфокусированный пучок лучей линзой L2 может сжечь матрицу камеры.

Контрольные вопросы

1. Что такое интерференция света?
2. Необходимое условие для создания интерференции света.
3. Почему при интерференции интенсивность оказывается больше суммы интенсивностей каждого пучка по отдельности?
4. Какие существуют способы создания когерентных пучков?
5. Какой метод получения когерентных лучей используется в интерферометре Майкельсона?
6. Приведите пример источников когерентного и некогерентного света.
7. Приведите примеры интерференции света в естественных условиях.

Лабораторная работа № 5 – 18

ИЗМЕРЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ПЛАСТИНЫ С ПОМОЩЬЮ ИНТЕРФЕРОМЕТРА МАЙКЕЛЬСОНА

Цель работы: измерив оптическую толщину, а также реальную толщину пластины определить показатель преломления материала, из которого состоит пластина.

Оборудование: интерферометр Майкельсона, плоскопараллельная пластина, штангенциркуль.

Теоретические сведения

Показатель преломления вещества – величина, равная отношению фазовых скоростей света (электромагнитных волн) в вакууме и в данной среде. Также о показателе преломления иногда говорят для любых других волн, например, звуковых, хотя в таких случаях, как последний, определение, конечно, приходится как-то модифицировать.

Показатель преломления зависит от свойств вещества и длины волны излучения, для некоторых веществ показатель преломления достаточно сильно меняется при изменении частоты электромагнитных волн от низких частот до оптических и далее, а также может еще более резко меняться в определенных областях частотной шкалы. По умолчанию обычно имеется в виду оптический диапазон или диапазон, определяемый контекстом.

Существуют оптически анизотропные вещества, в которых показатель преломления зависит от направления и поляризации света.

Такие вещества достаточно распространены, в частности, это все кристаллы с достаточно низкой симметрией кристаллической решетки, а также вещества, подвергнутые механической деформации.

Показатель преломления можно выразить как корень из произведения магнитной и диэлектрических проницаемостей среды:

$$n = \sqrt{\mu\varepsilon},$$

где μ – магнитная проницаемость среды, ε – диэлектрическая проницаемость среды.

Для измерения коэффициента преломления используют ручные и автоматические рефрактометры. При использовании рефрактометра для определения концентрации сахара в водном растворе прибор называют сахариметр.

Отношение синуса угла падения (α) луча к синусу угла преломления (γ) при переходе луча из среды А в среду В называется относительным показателем преломления для этой пары сред:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n.$$

Величина n есть относительный показатель преломления среды В по отношению к среде А, а $n' = \frac{1}{n}$ есть относительный показатель преломления среды А по отношению к среде В.

Эта величина при прочих равных условиях больше единицы при переходе луча из среды более плотной в среду менее плотную, и меньше единицы при переходе луча из среды менее плотной в среду более плотную (например, из газа или из вакуума в жидкость или твердое тело). Есть исключения из этого правила, и потому принято называть среду оптически более или менее плотной, чем другая (не путать с оптической плотностью как мерой непрозрачности среды).

Луч, падающий из безвоздушного пространства на поверхность какой-нибудь среды В, преломляется сильнее, чем при падении на нее из другой среды А; показатель преломления луча, падающего на среду из безвоздушного пространства, называется его абсолютным показателем преломления или просто показателем преломления данной среды. Это и есть показатель преломления, определение которого было дано в начале. Показатель преломления любого газа, в том числе

воздуха, при обычных условиях много меньше, чем показатели преломления жидкостей или твердых тел, поэтому приближенно (и со сравнительно неплохой точностью) об абсолютном показателе преломления (таблица) можно судить по показателю преломления относительно воздуха.

Показатели преломления различных сред

Среда	Показатель
Воздух (при обычных условиях)	1,0002926
Вода	1,332986
Глицерин	1,4729
Бензол	1,500
Органическое стекло	1,51
Фианит (CZ)	2,15–2,18
Кремний	4,010
Алмаз	2,419
Кварц	1,544
Киноварь	3,02
Топаз	1,63
Лёд	1,31
Масло оливковое	1,46
Сахар	1,56
Спирт этиловый	1,36
Слюда	1,56–1,60

Оптической длиной пути в однородной среде называется произведение расстояния S , пройденного светом в среде с показателем преломления n , на показатель преломления: $l = nS$

Для неоднородной среды необходимо разбить геометрическую длину на столь малые промежутки, что можно было бы считать на этом промежутке показатель преломления постоянным:

$$dl = ndS.$$

Вся оптическая длина пути находится интегрированием:

$$l = \int_A^B ndS.$$

Оптическая разность хода – это разность оптических длин путей световых волн, имеющих общие начальную и конечную точки. В кристаллооптике разность хода обозначается R . По определению

$$R = n_1 S_1 - n_2 S_2$$

В кристаллических анизотропных средах разность хода возникает из-за разных скоростей двух лучей в направлении, отличном от оптической оси.

Ещё один способ измерения коэффициента преломления, помимо рефрактометров, основан на использовании интерферометра Майкельсона.

Если внести в одно из плеч интерферометра плоскопараллельную пластинку, то оптический путь в этом плече изменится. Если эту пластинку вращать, то оптический путь света в пластине будет зависеть от угла поворота. В этом случае полосы интерференционной картины будут смещаться. Показатель преломления такой пластинки может быть рассчитан исходя из количества полос, прошедших, например, через центр экрана, и угла поворота пластинки.

Для расчёта соответствия количества интерференционных полос M и угла поворота пластины α обратимся к рис. 1. Рассмотрим случай, когда изначально пучок лазерного излучения падает на пластину толщиной h перпендикулярно поверхности пластины. После вращения пластины угол изменяется и станет равным α , соответственно изменится оптический путь, пройденный пучком в пластине. Путь, пройденный светом от светоделителя BS до зеркала M4, в случае $\alpha=0$, то есть для перпендикулярного падения на измерительную пластину S :

$$L_1 = f + hn + f_1,$$

а в случае повернутой пластины S' :

$$L_2 = f + xn + f_2,$$

где f – путь от светоделителя BS до пластинки S , f_1 и f_2 – пути от пластинки S до зеркала M4 в случае нормального падения света на пластину и падения под углом α соответственно, h – толщина пластины, x – путь, пройденный светом в повернутой пластине, n – коэффициент преломления пластины.

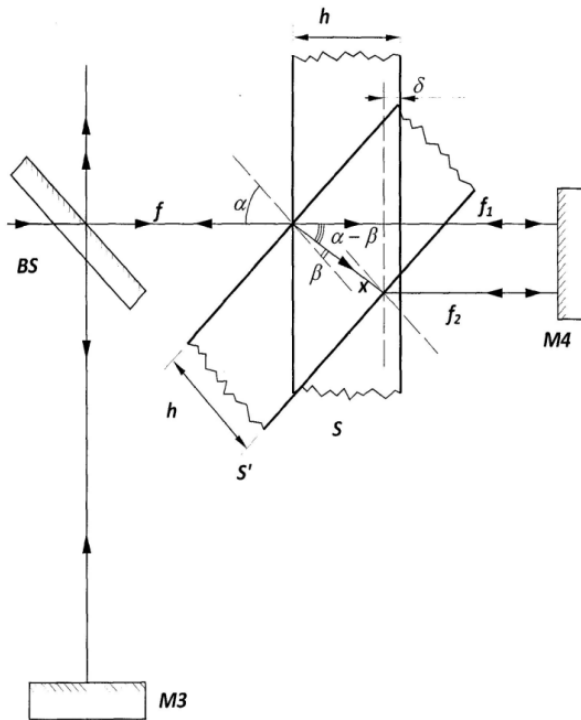


Рис. 1. Изображение хода лучей через плоскопараллельную пластину

Нас интересует разность хода светового пучка, возникающая при повороте пластины:

$$\Delta = L_2 - L_1 = n(x - h) + \delta,$$

где $\delta = f_2 - f_1$, Δ – оптическая разность хода двух лучей.

Согласно рис. 1 $\delta = h - x \cos(\alpha - \beta)$, тогда для разности хода можно записать

$$\Delta = n(x - h) + h - x \cos(\alpha - \beta),$$

где β – угол преломления луча.

Используя закон Снеллиуса, известное соотношение между квадратами синусов и косинусов $\cos \beta = \sqrt{1 - \sin^2 \beta}$ и связь между величинами x и h : $h = x \cos \beta$, можно записать

$$\frac{\Delta}{h} \cos \beta = n(1 - \cos \beta) + \cos \beta - \cos \alpha \cos \beta - \sin \alpha \sin \beta. \quad (1)$$

Количество полос M , прошедших через экран при повороте пластинки на угол α связано с разностью хода Δ :

$$\Delta = \frac{M\lambda}{2}, \quad (2)$$

где λ – длина волны излучения. Двойка в знаменателе появляется из-за учёта распространения света в обратном направлении.

Из формул (1) и (2) можно найти выражение для искомой величины n :

$$n = \frac{\left[\frac{M\lambda}{h} - 1 + \cos \alpha \right]^2 + \sin^2 \alpha}{2(1 - \cos \alpha) - \frac{M\lambda}{h}}. \quad (3)$$

В более общем случае, если учитывать преломления внешней среды (в нашем случае воздуха) $n_{\text{в}}$, та же самая зависимость будет выглядеть:

$$n = \frac{\left[\frac{M\lambda}{2h} - n_{\text{в}}(1 - \cos \alpha) \right]^2 + n_{\text{в}}^2 \sin^2 \alpha}{2n_{\text{в}}(1 - \cos \alpha) - \frac{M\lambda}{h}}. \quad (4)$$

Порядок выполнения работы

1. Включить компьютер и запустить приложение «Интерферометр».
2. Убедиться, что сигнал с камеры поступает в компьютер, для этого нужно снять защитный колпак. При этом вся рабочая область должна стать белого цвета.
3. Установить защитный экран так, чтобы цвет рабочей области стал наиболее тусклым.
4. Закрыть матрицу камеры защитным колпаком.
5. Включить He-Ne лазер, убедившись, что матрица камеры закрыта защитным колпаком.
6. Если в оптическом тракте находятся линзы L_1 и L_2 , то вывести их из тракта.
7. Отюстировать зеркала так, чтобы лучи с обоих плеч попадали в центр камеры, получить на экране 10 интерференционных полос.
8. Вставить в держатель поворотного столика RS измеряемую пластину. В случае необходимости скомпенсировать неплоскостность пластины поворотом зеркала МЗ.
9. Вращая поворотный столик, наблюдать смещение полос на экране в ту или иную сторону.

10. Найти положение угла поворотного столика, при котором полосы меняют направление своего движения. Этот угол соответствует перпендикулярному положению пластины относительно луча. Записать значение угла.

11. Вращая поворотный столик RS на произвольный угол α , посчитать количество полос, прошедших через центр.

12. С помощью штангенциркуля измерить толщину пластинки.

13. Посчитать показатель преломления пластины по формуле (4). Показатель преломления воздуха считать равным 1,000274.

Правила техники безопасности при выполнении работы

1. Избегайте попадания прямого и отраженного лазерного луча в глаза.

2. Следите за тем, чтобы интенсивность луча, падающего на матрицу камеры, была минимальна.

3. При внесении в оптический тракт линз сначала вносится линза L1, а затем линза L2, а убираются в обратном порядке, так как сфокусированный пучок лучей линзой L2 может сжечь матрицу камеры.

Контрольные вопросы

1. Что такое показатель преломления вещества?

2. От чего зависит показатель преломления вещества?

3. Что такое абсолютный и относительный показатели преломления?

4. Что такое оптическая длина пути?

5. Что такое оптическая разность хода?

6. Какой формулой описываются минимумы и максимумы интерференции?

7. Как изменяется оптическая длина пути при увеличении (уменьшении) угла падения?

Лабораторная работа № 5 – 19

ИЗУЧЕНИЕ ЗАТУХАЮЩИХ КОЛЕБАНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ КОНТУРЕ

Цель работы: изучение затухающих колебаний в колебательном контуре, определение параметров колебательного контура.

Приборы и принадлежности: настольная рабочая станция и макетная плата, NI ELVIS, компьютер, катушка индуктивности, конденсатор, резистор, соединительные провода.

Общее положение **Обзор NI ELVIS**

Функциональные возможности набора типовых лабораторных измерительных приборов в NI ELVIS реализованы на основе многофункционального устройства ввода-вывода (DAQ), специальной настольной рабочей станции, макетной платы и программ, разработанных в среде LabVIEW. В настольную рабочую станцию NI ELVIS встроены аппаратно-реализованные функциональный генератор и регулируемые блоки питания. А спроектированные в LabVIEW лицевые панели (Soft Front Panel – SFP) измерительных приборов объединяют функциональность DAQ-устройства (модуля ввода-вывода) и рабочей станции NI ELVIS, предоставляя возможность работы со следующими приборами:

- 1) генератором сигналов произвольной формы (Arbitrary Waveform Generator ARB);
- 2) анализатором амплитудно- и фазочастотных характеристик (Bode Analyzer);
- 3) устройством чтения с цифровой шины (Digital Bus Reader);
- 4) устройством записи на цифровую шину (Digital Bus Writer);
- 5) цифровым мультиметром (Digital Multimeter – DMM);
- 6) анализатором спектра (Dynamic Signal Analyzer – DSA);

- 7) функциональным генератором сигналов (Function Generator – FGEN);
 - 8) анализатором импеданса (Impedance Analyzer);
 - 9) осциллографом (Oscilloscope – Scope);
 - 10) анализатором вольтамперной характеристики двухполюсников (Two-Wire Current Voltage Analyzer);
 - 11) анализатором вольтамперной характеристики четырехполюсников (Three-Wire Current Voltage Analyzer);
 - 12) Регулируемыми источниками питания (Variable Power Supplies).
- Внешний вид NI ELVIS показан на рис. 1.

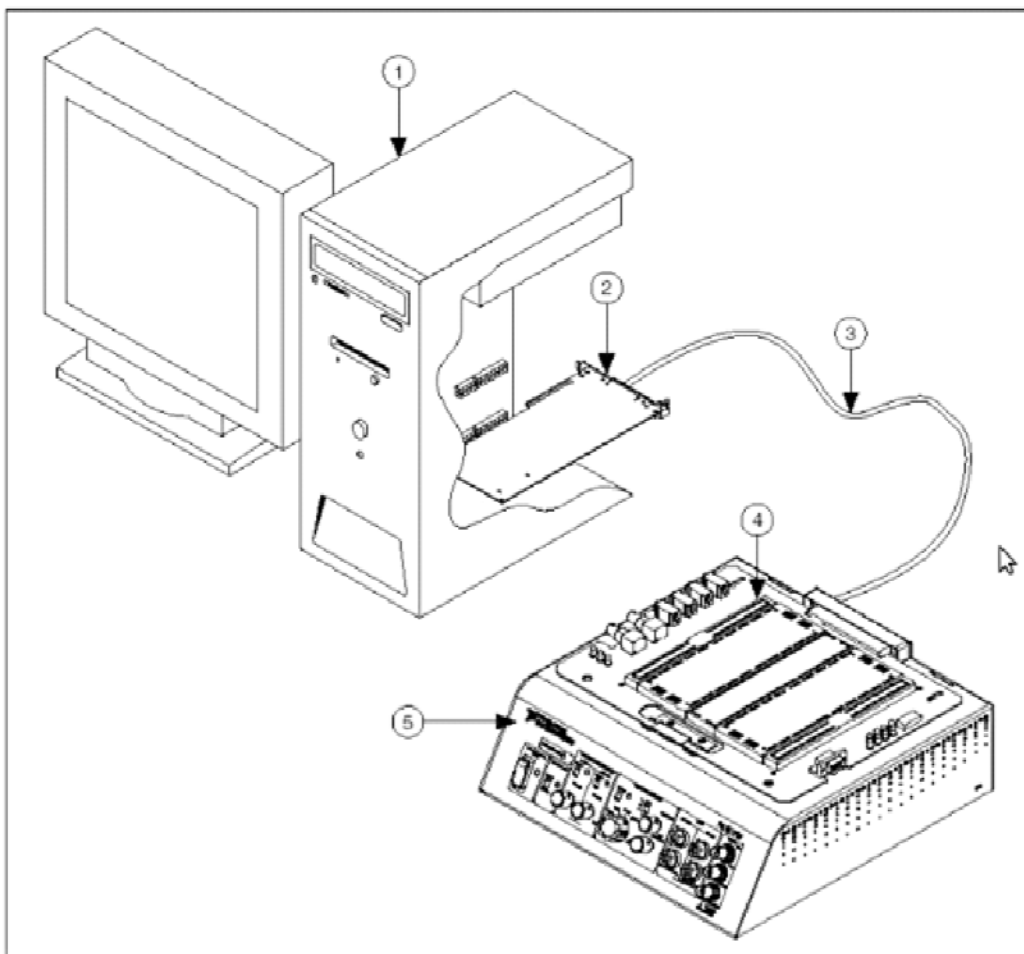


Рис 1. Схема размещения компонентов системы NI ELVIS на базе настольного компьютера: 1 – настольный компьютер; 2 – DAQ-устройство серии М с 68-контактным разъемом; 3 – экранированный кабель для устройств серии М; 4 – настольная рабочая станция NI ELVIS; 5 – лицевая панель рабочей станции

Кроме перечисленных приборов, в NI ELVIS имеется набор высокоуровневых функций LabVIEW, которые можно использовать для усовершенствования средств отображения данных и организации экспериментов, а также для управления рабочей станцией NI ELVIS из LabVIEW. В NI ELVIS версии 3.0 и выше управлять приборами NI ELVIS можно с помощью среды SignalExpress, которая не требует программирования. Из SignalExpress, помимо законченных приборов NI ELVIS, можно также использовать общие функциональные возможности аппаратных средств NI ELVIS, такие как аналоговый ввод (AI), аналоговый вывод (АО), цифровой ввод/вывод (DIO) и счетчик/таймер (CTR).

Порядок выполнения работы

Изучение затухающих колебаний

1. Собрать схему установки (рис. 2).
2. После проверки схемы преподавателем или лаборантом подать питание на установку и настольный компьютер.

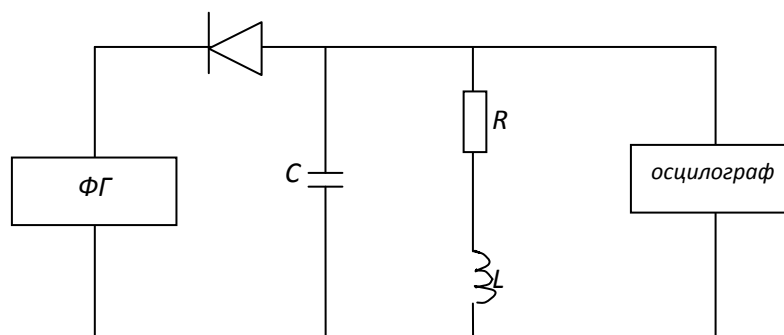


Рис 2. Схема установки

3. Запустить с рабочего стола компьютера ярлык «NI ELVIS». В открывшейся панели инструментов открыть кликом мыши окна виртуальных инструментов функционального генератора сигналов ФГ (Function Generator – FGEN) и осциллографа (Oscilloscope – Scope). (рис. 3)

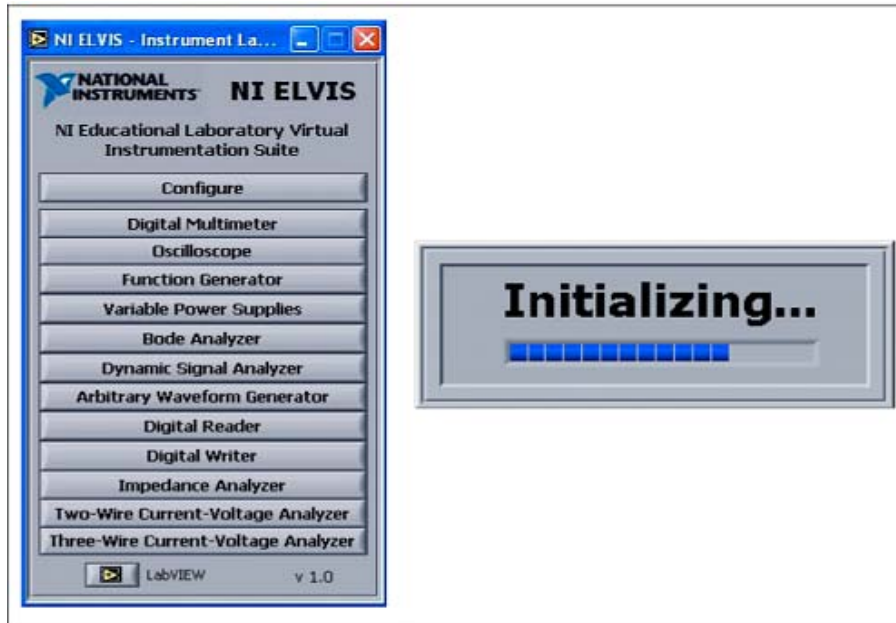


Рис. 3. Окно виртуальных приборов

4. Перевести функциональный генератор в ручной режим переключателем Manual. В окне виртуального прибора загорится индикатор Manual. Выставить частоту, равную 2.25 кГц ручкой Frequency (рис. 4).

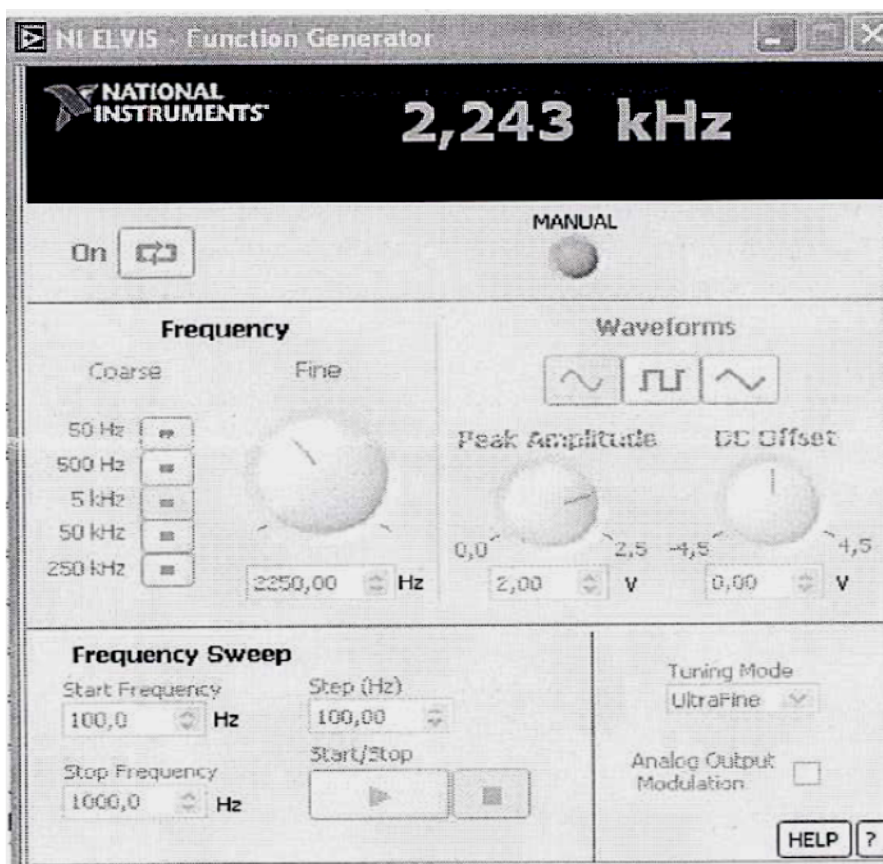


Рис. 4. Окно функционального генератора

5. В окне осциллографа выставить Couplig= AC; Scale=10mV; Timebase=10 μ s.

6. Подать питание на плату нажатием кнопки Prototyping Board Power.

7. На экране осциллографа появятся затухающие колебания (рис. 5).

8. Измерить амплитуды напряжения в момент времени t $Um(t)$ и через период $Um(t+T)$.

9. Рассчитать по известным формулам [1, 2, 5] частоту колебаний ω , логарифмический декремент затухания λ , коэффициент затухания β , добротность контура Q .

10. Увеличивая сопротивление R в колебательном контуре, наблюдать переход колебаний в аperiodический режим.

11. Зафиксировать значение критического сопротивления $R_{кр}$.

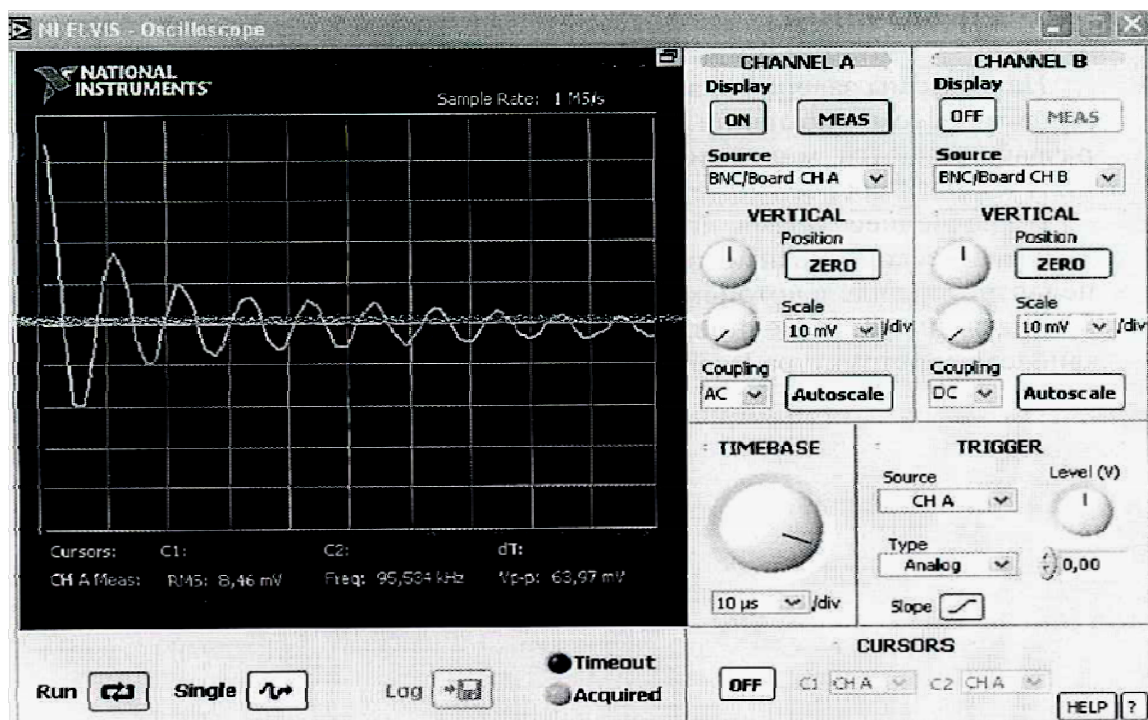


Рис. 5. Затухающие колебания

12. Выключить питание нажатием кнопки Prototyping Board Power.

13. Сравнить результаты, полученные в ходе лабораторной работы, с расчетными данными.

Контрольные вопросы

1. Чему равен период колебаний в контуре Томсона?
2. Дайте определение следующих характеристик гармонических колебаний: амплитуды, фазы, периода, частоты, циклической частоты.
3. Выведите дифференциальное уравнение, описывающее затухающие электромагнитные колебания и напишите его решение.
4. Что такое логарифмический декремент затухания и добротность колебательной системы? От каких параметров они зависят?
5. Как изменяется полное сопротивление контура при возрастании частоты?

МАЛАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СКАМЬЯ

Лабораторная работа № 5 – 20

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОКУСНОГО РАССТОЯНИЯ ЛИНЗЫ

Цель работы: получить различные изображения предметов при помощи линз, определить фокусное расстояние положительной (собирающей) и отрицательной (рассеивающей) линз.

Оборудование: малая оптическая скамья.

Краткие теоретические сведения

Линза (нем. Linse ,от лат Lens-чечевица) – прозрачное тело, ограниченное двумя поверхностями, преломляющими световые лучи, способное формировать оптические изображения предметов. Наиболее употребительны линзы со сферическими поверхностями, обладающие общей осью симметрии (оптическая ось).

Чаще всего рассматривают лучи, падающие на линзу под малым углом к оси.

Линза называется тонкой, если обе её вершины можно считать совпадающими, то есть толщина линзы мала по сравнению с радиусами кривизны ограничивающих поверхностей.

Точка, в которой после прохождения параллельным пучком лучей линзы пересекаются лучи пучка (или их продолжения, если линза превращает параллельный пучок в расходящийся) называется фокусом. Плоскость, перпендикулярная оптической оси и проходящая через фокус, называется фокальной плоскостью.

Если линза преобразует параллельный пучок лучей в сходящийся, её называют собирающей (положительной); если параллельный пучок превращается в расходящийся, линзу называют рассеивающей (отрицательной).

Точка пересечения тонкой линзы с оптической осью называется оптическим центром линзы. Расстояние от оптического центра линзы

до фокуса называется фокусным расстоянием (F). Измерять фокусное расстояние тонкой линзы имеет смысл с точностью до её толщины.

Мерой преломляющего действия линзы служит её оптическая сила (D) – величина, обратная фокусному расстоянию $D = \frac{1}{F}$.

Для тонкой линзы справедлива формула

$$\frac{1}{d} \pm \frac{1}{f} = \pm \frac{1}{F},$$

где d – расстояние от предмета до линзы, f – расстояние до изображения линзы, F – фокусное расстояние.

Знак «+» для положительной (собирающей) линзы, знак «-» для отрицательной (рассеивающей) линзы.

Порядок выполнения работы

1. При помощи собирающей линзы получить изображение светящегося «квадрата» на экране.
2. Получить чёткое изображение «квадрата» на экране.
3. Построить одно из изображений (обозначьте его рис.1)
4. Измерить расстояние от линзы до экрана (f) и от линзы до «квадрата» (d). Результаты измерений записать в табл. 1.

Таблица 1

№ опыта	Вид изображения	Расстояние от линзы до экрана $f, м$	Расстояние от линзы до «квадрата» $d, м$	Фокусное расстояние $F, м$	Оптическая сила линзы $D, дптр$
1					
2					
3					
Среднее значение					

5. Передвигая «квадрат» и экран, получить изображения других размеров. Результаты измерений записать в таблицу.

6. Написать формулу тонкой линзы. Вычислить фокусное расстояние и оптическую силу собирающей линзы. Результаты записать в таблицу.

7. Заменить в опыте собирающую линзу рассеивающей, попытаться получить изображения «квадрата». Отрицательный результат:

рассеивающая линза даёт только мнимые изображения, положения которых нельзя определить непосредственно с помощью экрана.

8. Для определения фокусного расстояния рассеивающей линзы использовать косвенный способ. Поставить между рассеивающей линзой и экраном короткофокусную собирающую линзу. Передвигая собирающую линзу и экран, получить резкое изображение «квадрата». Измерить расстояние d от рассеивающей линзы до «квадрата». Результаты измерений записать в табл. 2, идентичную табл. 1.

9. Убрать рассеивающую линзу. Изображение на экране исчезнет.

10. Передвинуть светящийся «квадрат» к собирающей линзе так, что бы на экране снова появилось резкое изображение разноцветных диодов. Это будет в том случае, если «квадрат» окажется в том месте, где было мнимое изображение, полученное от рассеивающей линзы.

11. Измерить расстояние f от места, где была рассеивающая линза, до теперешнего положения «квадрата», находящегося на месте мнимого изображения отрицательной линзы. Результаты измерений записать в табл. 2, идентичную табл. 1.

12. Повторить опыт ещё раз (пп. 8, 9, 10, 11).

13. Вычислить фокусное расстояние и оптическую силу рассеивающей линзы.

Результаты измерений записать в таблицу, идентичную таблице п. 4, и оценить погрешность измерений.

Контрольные вопросы

1. Что такое линза? Какая линза называется тонкой?
2. Что называется фокусом линзы?
3. Какую линзу называют собирающей, какую – рассеивающей?
4. Что такое оптическая сила линзы?
5. Напишите формулу тонкой линзы. В каком случае ставят знак «+», в каком знак «-»?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК*

1. *Савельев, И. В.* Курс общей физики. В 3 т. Т.2 / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1978. – 480 с.
2. *Трофимова, Т. И.* Курс физики / Т.И.Трофимова. – М. : Высш. шк., 1990. – 478 с.
3. *Ахманов, С. А.* Физическая оптика / С. А. Ахманов, С. Ю. Никитин. – М. : Наука, 2004. – С. 656.
4. Физическая энциклопедия / под ред. А. М. Прохорова. – М. : Сов. энцикл., 1988.
5. *Галкин, А. Ф.* Лекции по физике. В 4 ч. Ч. 4. Колебания, волны, оптика / А. Ф. Галкин ; Владим. гос. ун-т. – Владимир : Изд-во Владим. гос. ун-та, 2007. – ISBN 5-89368-710-8.
6. Прикладная физическая оптика / И. М. Нагибина [и др.]. – М. : Высш. шк., 2002.

* Публикуется в авторской редакции

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
Лабораторная работа № 5 – 15. ЮСТИРОВКА ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ МАЙКЕЛЬСОНА	5
Лабораторная работа № 5 – 16. ИЗМЕРЕНИЕ УГЛОВ СХОЖДЕНИЯ ЛУЧЕЙ В ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ МАЙКЕЛЬСОНА.....	22
Лабораторная работа № 5 – 17. НАБЛЮДЕНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ СФЕРИЧЕСКИХ ВОЛНОВЫХ ФРОНТОВ.....	26
Лабораторная работа № 5 – 18. ИЗМЕРЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ПЛАСТИНЫ С ПОМОЩЬЮ ИНТЕРФЕРОМЕТРА МАЙКЕЛЬСОНА.....	34
Лабораторная работа № 5 – 19. ИЗУЧЕНИЕ ЗАТУХАЮЩИХ КОЛЕБАНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ КОНТУРЕ.....	41
Приложение. МАЛАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СКАМЬЯ. Лабораторная работа № 5 – 20. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОКУСНОГО РАССТОЯНИЯ ЛИНЗЫ.....	47
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	50

ФИЗИКА

Методические указания к инновационным лабораторным работам
на базе лазерной установки «Интерферометр Майкельсона» и платформы NI ELVIS

Составители:

ГАЛКИН Аркадий Федорович
ДОРОЖКОВ Владимир Васильевич
ФУРОВ Леонид Викторович
и др.

Ответственный за выпуск – зав. кафедрой профессор В. В. Дорожков

Подписано в печать 11.11.11.

Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 3,02. Тираж 100 экз.

Заказ

Издательство

Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
600000, Владимир, ул. Горького, 87