

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Владимирский государственный университет
Кафедра физики и прикладной математики

ИСТОЧНИКИ И ПРИЕМНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Конспект лекций

Составитель
А. А. ЗАЯКИН

Владимир 2005

УДК 621.383
ББК 22.341.3
И 91

Рецензент
Кандидат физико-математических наук, доцент
Владимирского государственного университета
А.П. Аверин

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Владимирского государственного университета

Источники и приемники излучения: конспект лекций /
И 91 А. А. Заякин ; Владим. гос. ун-т. – Владимир : Ред.-издат. комплекс
ВлГУ, 2005. – 36 с.

Рассмотрены основные понятия фотометрии в энергетических и световых величинах, физические процессы, определяющие работу и технические характеристики источников и приемников излучения. Подробно обсуждаются приемники лазерного излучения широкого диапазона энергии и мощности.

Предназначен для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 072300 – лазерная техника и лазерные технологии.

Ил. 26. Библиогр.: 7 назв.

УДК 621.383
ББК 22.341.3

ВВЕДЕНИЕ

Во многих задачах детектирование и точное измерение интенсивности излучения являются определяющими для успешного проведения эксперимента. Выбор подходящего приемника для реализации оптимальной чувствительности и точности детектирования излучения должен учитывать его основные характеристики и особенности: длительность, спектральный состав, уровень мощности, поляризацию, пространственно-временное распределение. Различные участки спектра электромагнитного излучения различаются не по своей физической природе, а по способу генерации и приема излучения. Видимое (свет), инфракрасное и ультрафиолетовое излучения составляют оптическую область спектра. Выделение такой области обусловлено не только близостью соответствующих участков спектра, но и сходством методов и приборов, применяющихся для ее исследования. Оптический спектр занимает диапазон от условной границы инфракрасного излучения ($\lambda = 2$ мкм) до условной коротковолновой границы ультрафиолета ($\lambda = 10$ нм). В оптической области спектра частоты уже перестают быть малыми по сравнению с собственными частотами атомов и молекул, а длины волн большими по сравнению с молекулярными размерами и межмолекулярными расстояниями. Благодаря этому в этой области становятся существенными явления, обусловленные атомистическим строением вещества. По той же причине наряду с волновыми проявляются и квантовые свойства излучения.

В последнее время значительно увеличилась роль оптических методов исследования в науке и технике. Повышению эффективности эксперимента могут во многом помочь правильный выбор оптических схем и учет факторов, от которых зависят характеристики приборов. Поэтому в лекциях уделено достаточное внимание теоретическим основам процессов, определяющих основные характеристики и работу источников и приемников излучения.

1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Исходным физическим понятием при построении системы единиц измерений в оптике является излучаемая, воспринимаемая или переносимая излучением мощность. В системе энергетических величин мощность излучения Φ называется лучистым потоком, или потоком излучения, и измеряется в ваттах (Вт).

Излучение, как правило, всегда имеет сложный спектральный состав и может быть представлено набором определенных длин волн – дискретный спектр (рис.1) или всей совокупностью длин волн от нуля до беско-

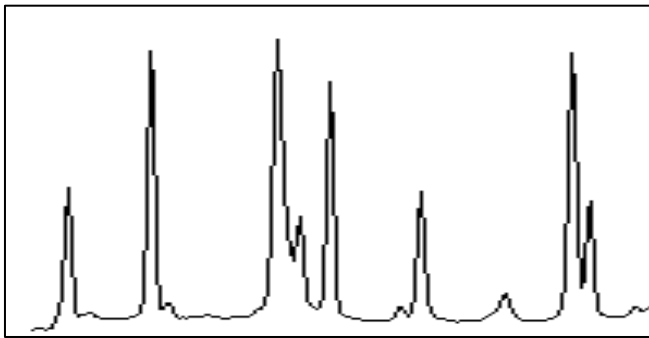


Рис. 1

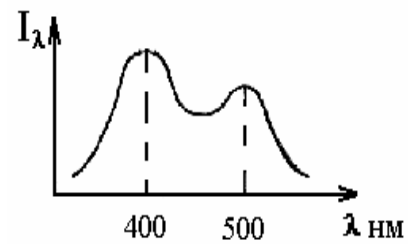


Рис. 2

нечности – сплошной спектр (рис. 2). Распределение лучистого потока по длинам волн характеризуют через *спектральную плотность потока излучения* Φ_λ , то есть потоком излучения, приходящимся на единичный интервал длин волн:

$$\Phi_\lambda = \frac{d\Phi}{d\lambda} \quad \text{или} \quad \Phi = \int_0^\infty \Phi_\lambda d\lambda.$$

Введем в рассмотрение поверхностную плотность потока излучения, характеризующего площадку как светящийся объект: $R = \frac{d\Phi}{dS}$. Величина R называется интегральной светимостью источника излучения.

Если поток излучения $d\Phi$ падает на площадку dS , то отношение потока к площади характеризует степень освещенности поверхности падающим на нее потоком. В этом случае эта величина обозначается буквой E и называется *освещенностью поверхности* $E = \frac{d\Phi}{dS}$.

Светимость и освещенность имеют одинаковую размерность, Вт/м².

Обычные источники испускают излучение в различных направлениях неодинаково. Распределение потока по направлениям в пространстве характеризуют силой излучения и яркостью источника.

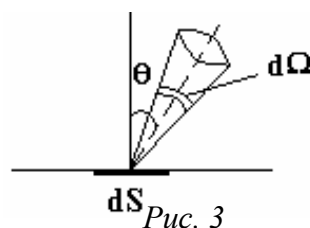
Силой излучения I , Вт/ср, называется отношение потока излучения $d\Phi$, распространяющегося в телесном угле $d\Omega$, к величине этого телесного угла: $I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$.

Телесный угол есть мера множества прилегающих друг к другу направлений в пространстве. Он измеряется отношением площади S , вырезаемой на поверхности сферы произвольного радиуса, к квадрату радиуса: $\Omega = \frac{S}{R^2}$. Единицей телесного угла является стерадиан, ср. Очевидно, что телесный угол полного пространства равен 4π . Можно доказать, что в сферических координатах $d\Omega = \sin \theta \, d\theta \, d\varphi$.

Яркостью B , Вт/(м²ср), поверхности называется отношение силы излучения элемента поверхности в выбранном направлении к площади проекции dS^* , излучающей площадки dS на плоскость, перпендикулярную этому направлению (рис. 3):

$$dS^* = dS \cdot \cos \theta \text{ - "видимая площадка",}$$

$$B = \frac{d\Phi}{\cos \theta \, dS \, d\Omega}$$



В отличие от всех описанных выше величин яркость является второй производной от потока (по площади и по телесному углу). Необходимость введения этого понятия обусловлена его практической важностью: именно эту величину непосредственно оценивает глаз – поверхности равной яркости представляются человеку равносветлыми.

Закон Ламберта

Если яркость представляет собой для данного источника величину постоянную, то есть не зависящую от угла наблюдения θ , то при данном телесном угле поток $d\Phi$ максимален в нормальном направлении к площадке и спадает при возрастании угла θ пропорционально $\cos \theta$. Это утверждение было впервые высказано Ламбертом (1760 г.) на том основании, что однородно светящийся шар визуально кажется плоским диском равномерной яркости (диск Солнца через туман). Источники, яркость поверхности которых не зависит от направления наблюдения, называются Ламбертовскими источниками.

1.1. Световые величины

Свет – это излучение, воспринимаемое глазом человека. На основании восприятия излучения средним человеческим глазом построена система единиц измерений световых величин, принятая в системе СИ. Основной единицей измерений является единица силы света 1 кандела, кд (в переводе - свеча). Долгое время обычная стеариновая свеча служила эталоном силы света в 1 кд. В последнее время предложен и реализован более стабильный и воспроизводимый с метрологической точки зрения эталон силы света в 1 кд – это сила света, испускаемого в направлении нормали с $1/60 \text{ см}^2$ поверхности платины, находящейся при температуре плавления $T = 2044,48 \text{ К}$ и нормальном атмосферном давлении.

Единицей измерения светового потока служит люмен, лм, единицей измерения освещенности – люкс, лк. Эти единицы измерений являются производными от единицы измерений силы света: $\text{лм} = \text{кд} \cdot \text{ср}$, $\text{лк} = \text{лм}/\text{м}^2$. Яркость измеряется в $\text{лм}/(\text{м}^2 \cdot \text{ср})$.

Поскольку глаз человека воспринимает излучение различных длин волн неодинаково, то соотношение между световыми (кд, лм, лк) и энергетическими ($\text{Вт}/\text{ср}$, Вт, $\text{Вт}/\text{м}^2$) единицами измерений зависит от спектрального состава излучения. На рис. 4 представлена зависимость относительной

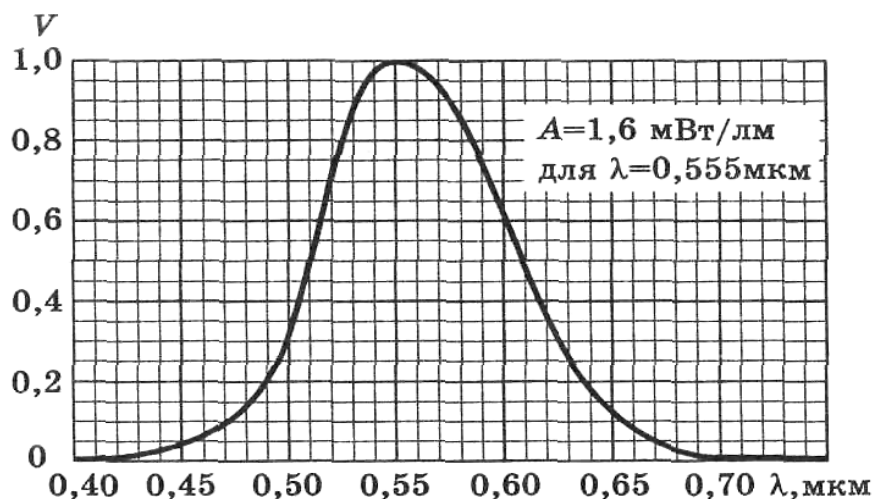


Рис. 4

спектральной чувствительности V среднего глаза человека от длины волны излучения λ .

Максимум чувствительности приходится на длину волны $0,555 \text{ мкм}$, которой соответствует коэффициент преобразования $A_0 = 1,6 \text{ мВт}/\text{лм}$. Ко-

эфициент преобразования для произвольной длины волны $A(\lambda)$ связан с относительной спектральной чувствительностью $V(\lambda)$ соотношением:

$$A(\lambda) = \frac{V(\lambda)\Phi_e}{\Phi_s},$$

где Φ_e – поток излучения, Вт, Φ_s – световой поток, лм. Таким образом, световому потоку 1 лм на длине волны, например 0,51 мкм, соответствует поток излучения ≈ 3 мВт, а на длине волны 0,45 мкм ≈ 40 мВт.

Для излучения сложного спектрального состава вводится понятие световой эффективности излучения – отношения светового потока излучения данного спектрального состава к его лучистому потоку:

$$K = \frac{1}{A} \frac{\int V(\lambda)f(\lambda)d\lambda}{\int f(\lambda)d\lambda}$$

где $f(\lambda)$ – спектральная плотность потока излучения, интегрирование производится во всем диапазоне длин волн от нуля до бесконечности. Например, световая эффективность излучения черного тела при температуре 5500 К (по спектральному составу близкого к прямым солнечным лучам) равна 91 лм/Вт.

Освещенность, создаваемая естественными источниками:

- солнце вне земной атмосферы $E \approx 1,35 \cdot 10^5$ лк;
- полная луна ночью $E \approx 0,1 \div 0,2$ лк;
- звездное небо ночью $E \approx 0,001$ лк.

1.2. Температура источника света

Радиационная температура $T_{\text{рад}}$. Характеризует энергетическую светимость как интегральную величину. При определении радиационной температуры измеряют энергетическую светимость тела и рассчитывают температуру, считая что оно излучает как абсолютно черное тело (АЧТ):

$$K = \delta \cdot T_{\text{рад}}^4, \text{ Вт/м}^2.$$

Для реальных тел радиационная температура всегда меньше истинной температуры тела $T_{\text{ист}}$.

Яркостная температура $T_{\text{я}}$. Характеризует спектральную плотность яркости поверхности тела. В отличие от $T_{\text{рад}}$ при определении $T_{\text{я}}$ учитывается спектральный состав излучения.

Спектральная плотность энергетической светимости для АЧТ

$$K_{\lambda} = \frac{2\pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot K \cdot T_{\text{я}}} - 1}}$$

Яркостную температуру измеряют с использованием светофильтров, выделяя из потока излучения с поверхности узкий спектральный интервал $\Delta\lambda$ в заданном направлении и сопоставляя результат измерений со спектральной плотностью яркости поверхности АЧТ. Если тело не является абсолютно черным, то $T_{\text{я}} < T_{\text{ист}}$

Цветовая температура $T_{\text{с}}$. Характеризует распределение спектральной плотности энергетической светимости поверхности источника

$$\frac{K_{\lambda 1}}{K_{\lambda 2}} = f(T_{\text{с}})$$

2. ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ

2.1. Лампы накаливания

Ввиду того, что хорошая модель АЧТ громоздка и неудобна в обращении, в фотометрической практике для абсолютных измерений пользуются другими источниками. Для видимой инфракрасной области это электрические лампы накаливания. Накаливаемая лента в этих лампах изготавливается из вольфрама, температура средней ее части определяется по силе тока, по прилагаемому к лампе паспорту. Поглощательная способность вольфрама A_{λ} зависит от длины волны, но эта зависимость хорошо известна и затабулирована. При температуре 2800 К $A_{\lambda} = 0,47$ для $\lambda = 0,35$, с увеличением длины волны A_{λ} уменьшается и для $\lambda = 1,5$ мкм составляет 0,3. Поэтому цветовая температура лампы накаливания оказывается больше истинной температуры. По значениям A_{λ} и по формуле Планка можно рассчитать спектральную плотность яркости лампы.

С увеличением температуры возрастает распыление с поверхности вольфрама и падает долговечность лампы. Средний ресурс ≈ 1000 часов.

Увеличению долговечности способствует наполнение лампы инертным газом и дополнительно добавление некоторого количества йода (рис. 5). При невысоких температурах йод взаимодействует с вольфрамом с образованием молекул WI_2 . В результате нагревания вольфрам испаряется с ленты и попадает на стенки, где происходит взаимодействие с йодом. Молекулы WI_2 при попадании на горячую ленту диссоциируют, выделяя W и молекулы I_2 . Благодаря такому (йодному) циклу срок службы лампы повышается почти в два раза.

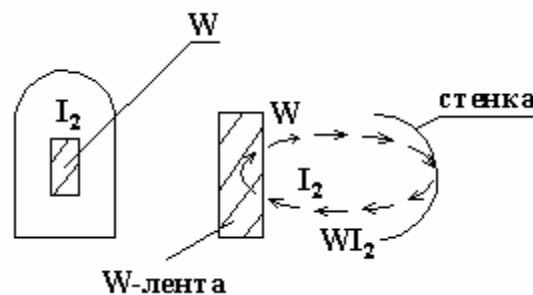


Рис. 5

2.2. Импульсные источники сплошного спектра

Стандартными сплошными спектрами для ультрафиолетовой области служат спектры, излучаемые при электрическом разряде высокого давления. На рис.6 показана принципиальная схема эталонных источников ЭВ – 45, ИСИ – 1. Конденсатор заряжается от источника высокого напряжения U через зарядное сопротивление R . После подачи управляющего импульса на сетку тиратрона конденсатор разряжается через капилляр

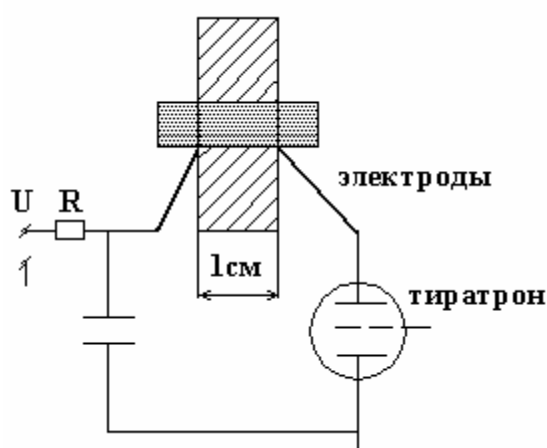


Рис. 6

ра, что приводит к образованию плазмы с давлением в десятки атмосфер и температурой $36000 \div 40000$ К, излучающей сплошной спектр. Длительность импульса излучения составляет $10 - 40$ мкс.

2.3. Источники дискретного спектра

Каждой температуре тела соответствует определенное равновесное распределение частиц по уровням энергии. Этим распределением определяется тепловое излучение тел. *Люминесценцией* называют излучение, возникающее тогда, когда равновесное состояние излучающего тела нарушено за счет какого-либо внешнего воздействия. Если за счет притока энер-

гии извне на высоких уровнях энергии оказывается больше излучающих частиц, чем при равновесном распределении, соответствующем данной температуре, то возникает избыточное (над тепловым) излучение.

Свечение электрического разряда в газах низкого ($\leq 0,1$ атм) давления является одним из наиболее изученных видов излучения. Спектр излучения таких разрядов богат линиями с разными энергиями возбуждения. Газоразрядные источники излучения с узкими и интенсивными спектральными линиями используются в технике спектрального анализа и в атомно-абсорбционных измерениях.

2.4. Лампы с полым катодом

В этих лампах (рис.7) тлеющий разряд формируется между анодом и цилиндрическим полым катодом или несколькими катодами, находящимися на достаточно большом расстоянии. С уменьшением расстояния между

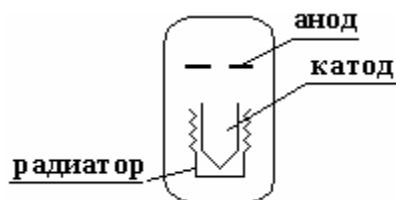


Рис. 7

катодами или давлением буферного газа (газа-наполнителя: обычно Ne, Xe, Ar) уменьшается ширина темных катодных пространств, сливаются области отрицательных свечений и вследствие роста плотности тока возрастает их яркость. По мере приближения плазмы разряда к

полому цилиндрическому катоду граница ее поверхности деформируется и приобретает вид воронки, вершина которой направлена по оси внутрь. Электроны, эмитированные в область катодного пространства, ускоряются и, попадая в плазменную воронку, проходят ее с большой скоростью. В области темного катодного пространства они тормозятся встречным полем, останавливаются и вновь начинают движение в обратном направлении, проходят через плазму и попадают опять в область катодного пространства. Далее цикл может повторяться. Поскольку потенциал полого катодного пространства обычно составляет 200 – 300 В, то электроны при ускорении получают энергию 200 – 300 эВ. Средние же потери энергии на столкновение электронов с атомами газа составляют примерно 10 эВ. Тогда один электрон способен многократно ионизовать газ-наполнитель, появляются вторичные электроны, плазма проникает внутрь катода. Внутри полости катода быстрые электроны осциллируют, их количество увеличивается, и возникает эффект полого катода.

Физические процессы в полом катоде. После зажигания разряда в полом катоде в стационарном режиме питания при малых давлениях буферного газа последовательно протекают следующие процессы: эмиссия электронов из холодного катода, распыление материала катода, возбуждение и излучение атомов газа и атомов материала катода. Причина увеличения потенциала катодного пространства заключается в локальной неоднородности плазмы по длине катода из-за различных путей тока разряда между анодом и катодом. Катодное распыление в тлеющем разряде с полым катодом происходит из-за бомбардировки его поверхности положительными ионами – ионы внедряются в катод, вызывая локальный нагрев до температуры испарения. В результате атомы металла покидают поверхность полого катода и диффундируют в разрядный промежуток. Таким образом, при протекании в разряде с полым катодом рассмотренных процессов наблюдается линейчатый спектр излучения атомов металла, атомов буферного газа и незначительное непрерывное излучение как результат рекомбинационных процессов. Спектры излучения атомов содержат большое количество спектральных линий разной интенсивности, среди которых наиболее важными являются *резонансные линии* – линии, соответствующие оптическим переходам электронов с низколежащих уровней, сильно связанных с основным состоянием, в основное состояние атома. У каждого атома имеется, как правило, несколько резонансных линий, значительно превосходящих по интенсивности все другие линии в спектре излучения.

Примеры ламп с полым катодом. Различные лампы с полым катодом отличаются элементами конструкции, материалом катода, параметрами электрической схемы питания. Широко распространенными лампами, серийно выпускаемыми отечественной промышленностью, являются лампы типа ЛСП с непрерывным возбуждением и охлаждаемым катодом, а также лампы типа ЛТ-2 с сильноточным импульсным режимом питания.

Характеристики ламп с полым катодом. Основными характеристиками не только ламп с полым катодом, но и других газоразрядных источников дискретного спектра, являются характеристики, определяющие метрологию атомно-абсорбционных измерений: отношение сигнал/фон, отношение сигнал/шум, нестабильность интенсивности резонансной линии, ширина резонансной линии, долговечность.

1. *Отношение сигнал/фон (С/ф)* – это отношение интенсивности резонансной линии к интенсивности фона (постоянной составляющей в спектре излучения). Фон измеряется в ближайшем от резонансной линии минимуме излучения. В лампах с полым катодом основным источником фона является излучение, принадлежащее крыльям близкорасположенных к резонансной спектральных линий. Отношение С/ф зависит от спектрального состава излучения атома, наличия примесей в лампе, ширины спектральной щели монохроматора, используемого в спектральном анализе. Для различных ламп с полым катодом это отношение может составлять $C/\phi \approx 20 \div 100$.
2. *Отношение сигнал/шум (С/ш)* – это отношение среднего значения интенсивности резонансной линии к среднеквадратичному значению шума. Физический смысл шума – флуктуации светового потока, вызванными нестационарными процессами плазмы разряда. Для ламп с полым катодом $C/\psi \approx 100$.
3. *Нестабильность интенсивности резонансной линии* характеризует дрейф светового излучения лампы. В метрологическом плане эта величина определяет воспроизводимость измерений. Расчет нестабильности производится по формуле $\psi = \frac{2(J_H - J_K)}{(J_H + J_K)t} \cdot 100\%$, где J_H, J_K – величины интенсивности в начале и в конце опыта через время t , мин.
4. *Ширина резонансной линии* для большинства ламп с полым катодом составляет $\approx 0,001 \div 0,005$ нм. Эта характеристика имеет исключительно важное значение при атомно-абсорбционных измерениях, поскольку определяет их точность и чувствительность.
5. *Долговечность* определяет время безотказной работы лампы, измеряется в мА·час. Лучшие лампы с полым катодом имеют долговечность около 5000 мА·час.

2.5. Высокочастотные безэлектродные лампы ВСБ-2

Лампы ВСБ-2 изготавливаются из кварцевого стекла в форме сферы диаметром около 2 см. В лампу помещают химически чистое вещество, заполняют ее инертным газом, играющим роль буферного газа, и отпаивают. Далее лампу размещают между электродами индуктора прибора питания, в котором создается высокочастотное электрическое поле. Электрический

разряд сначала поджигается в буферном газе, температура газа и стенок лампы повышается, вещество, размещенное в лампе, испаряется и поступает в область разряда. Спектр излучения ламп ВСБ-2 имеет дискретный характер и содержит спектральные линии вещества, размещенного в лампе, а также в небольшом количестве линии буферного газа. Преимуществом ламп ВСБ-2 по сравнению с лампами с полым катодом является отсутствие примесей посторонних элементов в спектре разряда, а также небольшая стоимость ламп и прибора питания. К недостаткам ламп ВСБ-2 можно отнести сравнительно низкое отношение сигнал/фон – из-за достаточно высокой температуры разряда, а также крайне низкую стабильность интенсивности излучения резонансных линий, что связано с оседанием паров вещества на стенках лампы, а также влиянием температуры окружающей среды на тепловой баланс лампы.

Безэлектродные лампы используются в основном для градуировки спектральных приборов.

3. ПРИЕМНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Приемники оптического излучения – устройства, изменение состояния которых (реакция) под действием оптического излучения служит для обнаружения и измерения этого излучения. По виду энергии, в которую преобразуется энергия оптического излучения, среди приемников оптического излучения можно выделить две основные группы – тепловые приемники и фотоэлектрические. Появление лазеров, обладающих необычно большой концентрацией энергии во времени или пространстве, обусловили выделение измерений лазерного излучения в самостоятельную область радиометрии, опирающуюся на собственную метрологическую базу. Излучение лазеров может иметь форму одиночных импульсов, может состоять из периодически повторяющихся импульсов или иметь непрерывный характер. В соответствии с этим его можно характеризовать энергией импульса, мгновенным значением мощности (потока излучения), средней мощностью, мощностью непрерывного излучения. При больших объемных плотностях энергии необходимо учитывать возможность нелинейных оптических явлений, фазовых переходов, изменения состояния поверхности приемного элемента приемника во время воздействия лазерного излучения, фазовых переходов. Для некоторых задач существенна высокая коге-

рентность лазерного излучения, которая проявляется в интерференционных явлениях, приводящих к перераспределению освещенности приемника.

Технические характеристики приемников излучения. Приемник излучения оценивается совокупностью параметров и характеристик, определяющих его качество и возможность использования для различных целей. К основным параметрам приемника относятся его чувствительность, уровень собственных шумов, постоянная времени, пороговый поток или обнаружительная способность. К геометрическим – приемная площадь, угол зрения и габаритные размеры. Рабочее напряжение, ток, сопротивление, емкость и максимально допустимая рассеиваемая мощность являются его электрическими параметрами. Многоэлементные приемники характеризуются дополнительно следующими параметрами: межэлементным зазором, плотностью упаковки по площади (коэффициентом заполнения), разбросом значений параметров. Основными характеристиками приемника являются спектральные, временные, пространственные и энергетические – зависимости основных параметров от длины волны, длительности импульса, пространственного распределения энергии и мощности регистрируемого излучения. Кроме этого, в процессе использования приемника существенную роль играют его эксплуатационные характеристики – зависимость параметров от радиационных, механических и климатических воздействий.

1. *Чувствительность* – отношение выходного сигнала к падающему потоку или энергии импульса излучения. Выходным сигналом приемника может быть напряжение или ток, поэтому различают токовую и вольттовую чувствительность. Зависимость чувствительности приемника от длины волны падающего на приемник излучения определяет спектральную характеристику чувствительности – относительную или абсолютную, а также диапазон длин волн, в котором приемник может использоваться. Неселективными называются приемники, чувствительность которых в рабочем интервале длин волн не зависит от длины волны регистрируемого излучения.
2. *Уровень собственных шумов.* Его величина измеряется в единицах шумового тока или напряжения и приводится к единичной полосе частот измерительного тракта.

3. *Динамический диапазон измерений.* Подразумевают интервал от минимального до максимального значения соответствующего параметра, который может быть достаточно надежно охвачен приемником.

4. *Быстродействие* – характерное время τ нарастания выходного сигнала – позволяет оценить возможности приемника при измерении параметров импульсных и импульсно-периодических источников излучения. Быстродействие характеризует инерционность приемника.

Структурная схема приемников излучения.

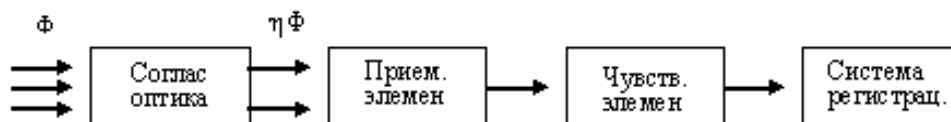


Рис. 8

Поток излучения Φ через согласующую оптику (линзы, зеркала, пластинки) попадает на приемный элемент (рис. 8). Коэффициент η учитывает потери на отражение, поглощение во входном оптическом блоке. В приемном элементе происходит взаимодействие излучения с материалом приемника, в результате изменяется состояние приемного элемента (повышается температура, изменяются электропроводность, емкость или изменяются другие физические величины). С помощью чувствительного элемента произошедшие в приемном элементе изменения преобразуются в электрический сигнал (ток или напряжение), который регистрируется системой регистрации. В некоторых приемниках излучения – например, в болометрах – приемный и чувствительный элементы могут быть совмещены.

3.1. Тепловые приемники излучения

Принцип работы тепловых приемников излучения (ТПИ) состоит в том, что под действием поглощенного излучения повышается температура приемного элемента и изменяется параметр, зависящий от температуры (например, сопротивление, емкость, поляризация, термоэлектродвижущая сила, давление).

По принципу действия ТПИ можно разделить на следующие типы:

Калориметры – неселективные приемники, в которых поглощается практически все падающее на приемный элемент излучение независимо от его спектрального состава.

Болометры – приемники, в которых нагрев излучением приемного элемента приводит к изменению его электрического сопротивления. Приемный элемент болометра является одновременно и чувствительным элементом приемника.

Пироэлектрические приемники – приемники, в которых при изменении температуры приемного элемента изменяется его спонтанная поляризация и емкость.

Термоэлементы – приемники, в которых увеличение температуры приводит к появлению термоэлектродвижущей силы.

Измерение мощности излучения

Рассмотрим тепловой баланс ТПИ при измерении мощности непрерывного излучения. Поглощенный поток (мощность) излучения $\eta\Phi$ расходуется на нагрев приемного элемента, часть тепла рассеивается в окружающую среду:

$$\eta\Phi = C \cdot \frac{dT}{dt} + G(T - T_0),$$

где C – теплоемкость приемного элемента, Дж/К;

G – эффективный коэффициент теплообмена, Вт/К;

T – температура приемного элемента, К;

T_0 – температура резервуара или окружающей среды, в которую происходит теплоотвод;

В стационарном режиме работы вся мощность будет отводиться в окружающую среду. Пусть $\Phi = \text{const}$, коэффициенты C и G не зависят от температуры.

Проинтегрируем:

$$C \frac{dT}{dt} = \eta\Phi - G(T - T_0); \quad \frac{dT}{\left(\frac{\eta\Phi}{G} - (T - T_0)\right)} = \frac{G}{C} dt;$$

$$-\ln\left(-\left(T - T_0\right) + \frac{\eta\Phi}{G}\right) = \frac{G}{C}t + \text{const}$$

Константу найдем из начальных условий: при $t = 0$, $T = T_0$

$$\text{Const} = -\ln\left(\frac{\eta\Phi}{G}\right); \quad \ln\left(\frac{\eta\Phi}{G} - (T - T_0)\right) - \ln\left(\frac{\eta\Phi}{G}\right) = -\frac{G}{C}t,$$

обозначим $\tau = C/G$ - характерное время нарастания сигнала, тогда

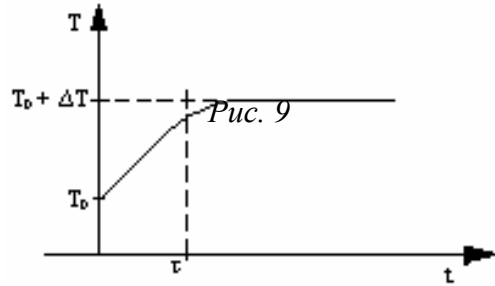
$$T = T_0 + \frac{\eta\Phi}{G} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right).$$

Если $t \rightarrow \infty$, то $T \rightarrow T_0 + \frac{\eta\Phi}{G}$. При измерении непрерывного излучения по-

стоянной мощности температура приемного элемента увеличивается на

$\Delta T = \frac{\eta\Phi}{G}$ (рис. 9). Постоянная времени

приемника τ , характеризующая его инерционность, прямо пропорциональна его теплоемкости и обратно пропорциональна коэффициенту теплообмена с окружающей средой. Поскольку увеличение коэффициента теплообмена приводит также и к уменьшению приращения температуры приемного элемента, а значит и к уменьшению чувствительности $S = \frac{\Delta T}{\Phi} = \frac{\eta}{G}$, что нежела-



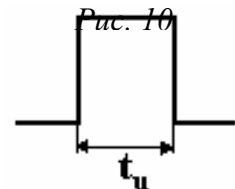
тельно, то при разработке малоинерционных приемников идут по пути уменьшения теплоемкости. Приемный элемент в таких приборах имеет вид тонкой пленки на твердой подложке.

Поскольку увеличение коэффициента теплообмена приводит также и к уменьшению приращения температуры приемного элемента, а значит и к уменьшению чувствительности $S = \frac{\Delta T}{\Phi} = \frac{\eta}{G}$, что нежела-

тельно, то при разработке малоинерционных приемников идут по пути уменьшения теплоемкости. Приемный элемент в таких приборах имеет вид тонкой пленки на твердой подложке.

Измерение энергии импульсов излучения

Пусть на вход приемника подается импульс излучения прямоугольной формы длительностью t_u (рис. 10). К концу импульса температура приемного элемента повы-



шается на величину $\Delta T = \frac{\eta\Phi}{G} \left(1 - e^{-\frac{t_u}{\tau}} \right)$. Таким образом,

результат измерений зависит от соотношения длительности импульса и инерционности приемника.

Если длительность t_u мала по сравнению с τ , то получается

$\Delta T = \frac{\eta\Phi}{G} \left(1 - e^{-\frac{t_u}{\tau}} \right) \approx \frac{\eta\Phi}{G} \left(1 - 1 + \frac{t_u}{\tau} \right) = \frac{\eta\Phi}{G} \frac{t_u}{\tau}$. Поскольку произведение по-

тока и длительности импульса равно энергии импульса излучения $E_{\text{и}} = \Phi t_{\text{и}}$ и учитывая, что $\tau = C/G$, получаем

$$\Delta T = \frac{\eta E_{\text{и}}}{C}.$$

Если же длительность импульса значительно превышает постоянную времени приемника τ , то

$$\Delta T = \frac{\eta \Phi}{G} \left(1 - e^{-\frac{t_{\text{и}}}{\tau}} \right) \approx \frac{\eta \Phi}{G}.$$

Таким образом, если приращение температуры в стационарном режиме пропорционально поглощаемой мощности, то максимальное приращение при импульсном нагреве пропорционально поглощенной энергии импульса. Этот вывод оказывается верным и для других измерительных систем: если длительность воздействия сигнала много меньше постоянной времени системы, то максимальное показание пропорционально энергии сигнала. Наоборот, если длительность воздействия на систему много больше постоянной времени, то ее показания определяются мощностью.

Измерение средней мощности импульсно-периодического излучения

Пусть на вход приемника подается импульсно-периодическое излучение с длительностью импульсов $t_{\text{и}}$ и частотой следования импульсов f . В интервале между импульсами приемный элемент остывает

$$C \frac{dT}{dt} + G(T - T_0) = 0.$$

После интегрирования получим:

$$T - T_0 = \text{const} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

Константу определим из начальных условий (при $t = 0$ температура приемника равна температуре, достигнутой к концу импульса излучения). К моменту прихода второго импульса излучения температура приемника будет равна:

$$T_1 = T_0 + \frac{\eta \Phi}{G} \left(1 - e^{-\frac{t_{\text{и}}}{\tau}} \right) e^{-\frac{1}{f\tau}}.$$

Приемный элемент за межимпульсный период длительностью $1/f$ не успевает охладиться до температуры окружающей среды, поэтому в результате последовательного действия импульсов излучения предимпульсная температура постепенно повышается. Через достаточно большой период времени в приемном элементе установится состояние динамического равновесия, когда увеличение температуры за время действия импульса излучения будет равно уменьшению температуры в результате остывания в межимпульсный период. Обозначим T_p – температура перед очередным импульсом излучения, T_m – максимальная температура к концу импульса излучения, тогда интегрируя уравнения теплового баланса во время действия импульса и в межимпульсный период получим

$$T_m = T_0 + \frac{\eta\Phi}{G} \left(1 - e^{-\frac{t_u}{\tau}} \right) + (T_p - T_0) e^{-\frac{t_u}{\tau}}; \quad T_p = T_0 + (T_m - T_0) e^{-\frac{1}{f\tau}}.$$

Рассмотрим практически важный случай коротких ($t_u \ll \tau$) импульсов. В этом случае первое равенство упрощается: $T_m = T_p + \frac{\eta E}{C}$. Окончательно для температуры приемника перед импульсом T_p и после окончания импульса излучения T_m получим

$$T_p = T_0 + \frac{\eta E}{C} \left(e^{\frac{1}{f\tau}} - 1 \right)^{-1}, \quad T_m = T_0 + \frac{\eta E}{C} \left(1 - e^{-\frac{1}{f\tau}} \right)^{-1}.$$

Из этих выражений видно, что если длительность межимпульсного интервала много меньше постоянной времени приемника ($1/f \ll \tau$), то температура приемного элемента за время действия импульса изменяется незначительно:

$$T_p \approx T_m \approx T_0 + \frac{\eta E}{C} \left(1 + \frac{1}{f\tau} - 1 \right)^{-1} = T_0 + \frac{\eta E f \tau}{C} = T_0 + \frac{\eta \bar{\Phi} C}{C G} = T_0 + \frac{\eta \bar{\Phi}}{G}.$$

В этом случае разность температур $\Delta T = T_m - T_0$ пропорциональна средней мощности излучения $\bar{\Phi} = Ef$. В другом предельном случае, когда длительность межимпульсного интервала много больше постоянной времени приемника ($1/f \gg \tau$), предимпульсная температура мало отличается

от температуры окружающей среды, а разность температур $\Delta T = T_m - T_0 \approx \frac{\eta E}{C}$ пропорциональна энергии импульса излучения.

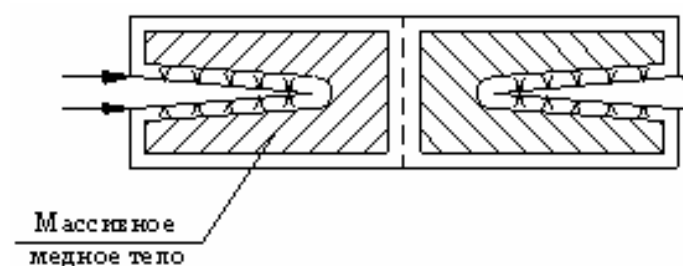


Рис. 11

3.1.1. Измеритель мощности оптический (ИМО-2)

На рис. 11 показано устройство приемного элемента серийно выпускаемого прибора ИМО-2, предназначенного для измерения как средней (или

постоянной) мощности, так и для измерения энергии одиночных импульсов. Приемный элемент выполнен в виде медного конуса, покрытого оксидом меди, обладающей высоким коэффициентом поглощения. Угол при вершине конуса достаточно мал ($\approx 17^\circ$), что за счет многократных отражений приводит к практически полному поглощению излучения любого спектрального состава в видимой и ближней ИК области спектра. На второй точно такой же конус, расположенный справа, не поступает излучение — он служит для компенсации изменений температуры окружающей среды. Чувствительным элементом служит батарея термопар, расположенная между поглощающим конусом и массивным медным телом, играющим роль теплового резервуара. Благодаря большому количеству термопар в батарее (~ 1000) осуществляется усреднение результата измерений температуры, а также эффективный отвод тепла от приемного элемента.

Конструктивно выделенный приемный элемент прибора ИМО-2 удобен для применения одного из наиболее точных методов измерения чувствительности приемника излучения — *метода электрического замещения*. Измерительный конус оснащается подогревательной электрической обмоткой, и нагрев, вызванный измеряемым излучением, сравнивается с нагревом, создаваемым обмоткой. Электрическая мощность или электрическая энергия, выделяемые в подогревательной обмотке, измеряются достаточно точно. Контроль чувствительности осуществляется непосредственно перед проведением оптических измерений.

Параметры приемника ИМО-2:

– средняя мощность, Вт	$3 \cdot 10^{-4} \dots 100;$
– энергия импульса, Дж	$3 \cdot 10^{-3} \dots 10;$

– диаметр луча, мм	4...12;
– длина волны, мкм	0,4...10,6;
– погрешность	3÷6%;
– максимальная плотность мощности, Вт/см ²	3;
– максимальная плотность энергии (при – длительности импульса ≥ 1 мс), Дж/см ²	20.

3.1.2. Калориметр ТПИ-2М

Калориметр (рис. 12) предназначен для измерения энергии мощных лазеров. Приемный элемент сделан из графита, его рельефная поверхность позволяет уменьшить освещенность. Чувствительным элементом служит батарея термопар, через которую осуществляется также и теплоотвод от приемного элемента к корпусу калориметра. Поверхность корпуса, обращенная к приемному элементу, выполнена зеркальной для уменьшения радиационных потерь калориметра. Принцип электрического замещения не используется, калориметр ТПИ – 2М нуждается в периодической градуировке (определения чувствительности).

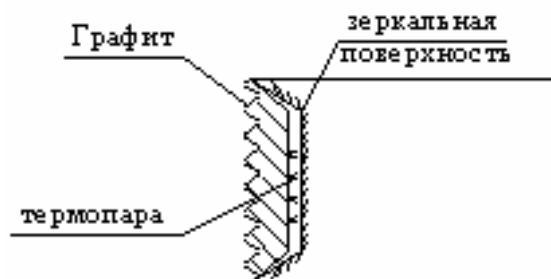


Рис. 12.

Принцип электрического замещения не используется, калориметр ТПИ – 2М нуждается в периодической градуировке (определения чувствительности).

Характеристики ТПИ-2М:

энергия импульса, Дж	1... 800;
спектральный интервал, мкм	0,5... 10,6;
геометрические размеры, мм	60 x 60;
относительная погрешность, %	6.

3.1.3. Приемник Голея

Один из первых тепловых приемников излучения. Измеряемое излучение, попадая на поверхность приемного элемента, частично поглощается. Чувствительным элементом служит газ, заполняющий цилиндр с гофрированными стенками (рис. 13). Повышение температуры газа в этом цилиндре приводит к увеличению объема и движению подвижной части цилиндра. Перемещение тыльной поверхности цилиндра контролируется парой светодиод-фотодиод.

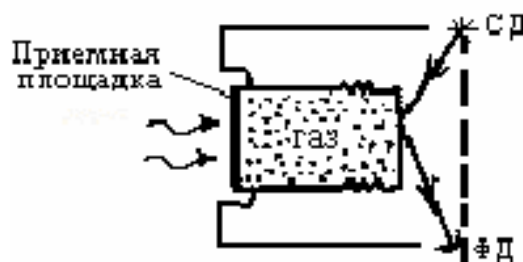


Рис. 13.

3.1.4. Болометры

Болометры представляют собой тепловые приемники, действие которых основано на изменении сопротивления при поглощении падающего потока излучения. Приемным элементом болометра служит тонкая прово-

дующая пленка или проволочка, нагревание которой ведет к изменению ее сопротивления. Таким образом, приемный элемент является также и чувствительным элементом приемника. Изменение сопротивления измеряется с помощью соответствующей электрической схемы. Чаще всего используется мостовая схема, работающая на постоянном или переменном токе.

Примеры конструктивного исполнения болометров показаны на рис. 14, 15. Тонкую металлическую пленку получают методом испарения в вакууме или методом электролитического осаждения. Снижение инерционности достигают за счет утончения пленки и использования подложек с высоким коэффициентом теплопроводности. Наилучшие результаты получены с никелевыми и висмутовыми болометрами, оптимальная толщина пленки для которых составляет 0,1 мкм, постоянная времени $10^{-2} \div 10^{-4}$ с. Проволочные болометры изготавливают в виде решеток, поскольку коэффициент поглощения излучения проволочкой существенно зависит от поляризации излучения.

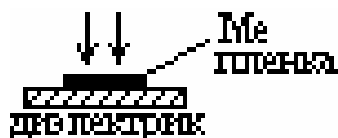


Рис. 14

Чаще всего используются проволочки из никеля, вольфрама или платины диаметром от 5 мкм до 100 мкм. Площадь приемного элемента таких болометров может достигать величин порядка 1 м^2 , что значительно превосходит площадь тонкой пленки ($\sim 1 \text{ см}^2$). Другим преимуществом проволочных болометров является то, что приемный элемент перекрывает лишь небольшую часть $\sim 2 \cdot 2d/h$ падающего излучения (здесь d – диаметр проволочки, h – расстояние между проволочками, $2d/h$ – геометрическая тень, коэффициент 2 учитывает дифракционные потери).

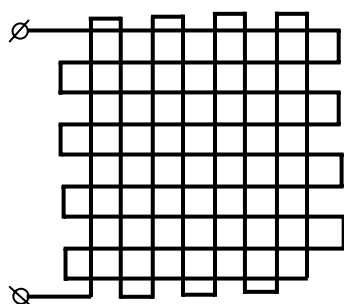


Рис. 15

Пример: $d = 5 \text{ мкм}$, $h = 1 \text{ мм}$. $\frac{4d}{h} = \frac{4 \cdot 5 \cdot 10^{-6}}{10^{-3}} = 0,02$.

Болометры являются селективными приемниками излучения и нуждаются в регулярной градуировке, поскольку коэффициент поглощения излучения приемного элемента изменяется под воздействием излучения и влияния окружающей среды.

Электротепловая связь

Рассмотрим болометр сопротивлением R_{σ} , включенный в мостовую схему с нагрузочным резистором R_H (рис. 16). Сопротивления моста R_1 и R_2 подбирают так, чтобы при отсутствии облучения ток через гальванометр G был равен нулю. Через болометр протекает ток $I = \frac{\varepsilon}{R_{\sigma} + R_H}$, и в нем рассеивается мощность джоулевых потерь $P = I^2 R_{\sigma}$, что приводит к увеличению температуры болометра и его сопротивления

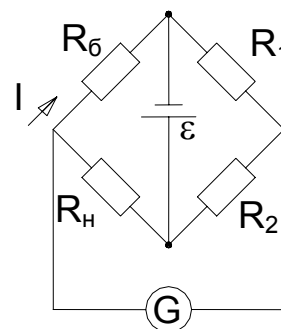


Рис. 16

$$R_{\sigma} = R_0 (1 + \alpha (T - T_0)),$$

где T_0, T - температура окружающей среды и болометра соответственно, R_0 - сопротивление болометра при температуре T_0 , α - термический коэффициент сопротивления. При этом уравнение теплового баланса имеет вид

$$P_0 = G_0 (T - T_0),$$

где G_0 - эффективный коэффициент теплообмена в отсутствии облучения.

При облучении потоком Φ уравнение теплового баланса примет вид

$$\eta \Phi + P_0 + \frac{dP}{dT} = C \frac{d(T' - T_0)}{dt} + G(T' - T_0),$$

где η - коэффициент поглощения излучения болометром, G - суммарный коэффициент теплопотерь при облучении, T' - температура болометра, находящегося под облучением.

Вычислим производную

$$\frac{dP}{dT} = \varepsilon^2 \frac{\frac{dR_{\sigma}}{dT} (R_{\sigma} + R_H)^2 - 2(R_H + R_{\sigma}) \frac{dR_{\sigma}}{dT} R_{\sigma}}{(R_{\sigma} + R_H)^4} = \frac{\varepsilon^2 \alpha R_0}{(R_{\sigma} + R_H)^2} \frac{R_H - R_{\sigma}}{R_{\sigma} + R_H} = P_0 \alpha \frac{R_H - R_{\sigma}}{R_H + R_{\sigma}}$$

Тогда уравнение теплового баланса запишется:

$$\eta \Phi = C \frac{d(T' - T_0)}{dt} + G_3 (T' - T_0),$$

где $G_s = G - \alpha G_0(T - T_0) \frac{R_n - R_b}{R_n + R_b}$ – эффективный коэффициент теплопотерь, учитывающий электротепловую связь.

Эффект электротепловой связи в тепловых приемниках излучения присущ лишь болометрам и обусловлен протеканием тока по приемному (чувствительному) элементу. Суть его состоит в том, что при изменении сопротивления болометра под облучением в нем дополнительно рассеивается джоулево тепло, которое влияет на выходной сигнал. У металлических болометров термический коэффициент сопротивления положителен, поэтому при $R_n > R_b$ электротепловая связь положительна (уменьшается эффективный коэффициент теплопотерь G_s , что приводит к возрастанию выходного сигнала). Отметим, что при определенных условиях эффективный коэффициент теплопотерь может быть отрицателен – это может привести к неустойчивому режиму работы при котором наступает неконтролируемый разогрев и перегорание болометра.

Полупроводниковые болометры

У полупроводниковых материалов зависимость сопротивления от температуры обычно описывается уравнением вида

$$R = R_0 \exp(A'/T),$$

где A' – положительная постоянная. Принимая во внимание, что температурный коэффициент сопротивления $\alpha = \frac{1}{R_b} \frac{dR_b}{dT}$, получаем $\alpha = -\frac{A'}{T^2}$.

С увеличением температуры сопротивление полупроводниковых материалов уменьшается. Типичное значение $A' = 300$ К, а температурный коэффициент сопротивления на порядок выше, чем у металлов. Поэтому полупроводниковые болометры обладают большей, чем металлические, вольт-ваттной чувствительностью, несмотря на то, что чувствительные элементы у них значительно толще (5 – 50 мкм). Возрастание теплоемкости у этих болометров приводит к повышению инерционности и для ее снижения чувствительные элементы монтируют в непосредственном тепловом контакте с подложкой, обладающей хорошей теплопроводностью.

Для полупроводниковых болометров, когда $\alpha < 0$, из-за эффекта электротепловой связи опасны малые нагрузочные сопротивления, так как это может привести к потере устойчивости. В тонких полупроводниковых пленках достаточно велики шумы, что ухудшает пороговый поток.

Криогенные болометры (металлические)

Охлаждение чувствительных элементов металлических болометров приводит к снижению уровня шумов, а также к быстрому уменьшению при низких температурах теплоемкости, пропорциональной T^3 . В результате уменьшается пороговый поток и снижается инерционность приемника. Для металлов, находящихся при температуре ниже дебаевской температуры, возрастает температурный коэффициент сопротивления α – у никелевых пластинок чистотой 99,99 % при температуре жидкого азота α возрастает в 4 раза по сравнению с величиной при комнатной температуре. Увеличение температурного коэффициента сопротивления приводит к увеличению чувствительности болометра.

Сверхпроводящие болометры

Известны два типа сверхпроводящих болометров – изотермические и неизотермические. Сверхпроводящие болометры на основе нитрида ниобия являются представителями изотермических болометров, у которых рабочая точка выбирается в области сверхпроводящего перехода. В отличие от них у неизотермических болометров средняя часть чувствительного элемента находится в нормальном состоянии, а концы – в сверхпроводящем благодаря температурному градиенту. При облучении изменяется длина той части, которая находится в состоянии сверхпроводимости, отсюда следует изменение сопротивления. Сверхпроводящие болометры имеют сверхвысокую чувствительность.

3.1.5. Термоэлементы

Термоэлемент – приемник излучения, действие которого основано на термоэлектрическом эффекте. Приемная площадка A_0 находится в хорошем тепловом контакте с горячим спаем термопары (рис. 17). Холодный спай термопары, изолированный от облучаемой площадки и включенный навстречу горячему, служит для уменьшения влияния температуры окружающей среды. Облучение приемной площадки приводит к повышению температуры горячего спаия и появлению термоэлектродвижущей силы.

В термоэлементах также присутствует электротепловая связь, которая обусловлена

тем, что благодаря *эффекту Пельтье* протекающий в цепи ток приводит к

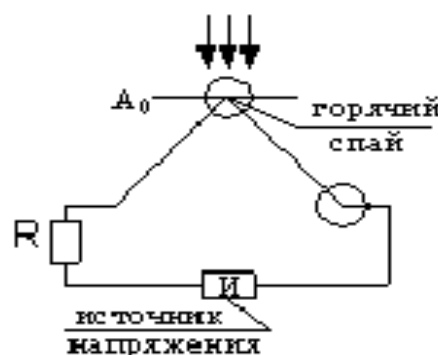


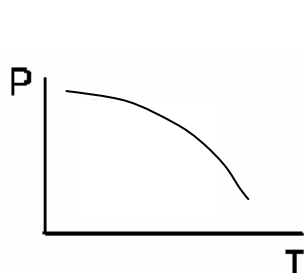
Рис. 17

охлаждению горячего спая, если ток течет в направлении термоэлектродвижущей силы. При этом мощность, отводимая от спая, пропорциональна силе тока и температуре. Величина тока определяется параметрами цепи, в которую включен термоэлемент, поэтому повышение температуры при облучении также связано со схемой включения термоэлемента.

3.1.6. Пироэлектрические приемники

Пироэлектрические приемники излучения (ППИ) принадлежат к новому поколению тепловых приемников. Существенным преимуществом ППИ является малая постоянная времени. Качественное отличие ППИ от других тепловых приемников состоит в том, что выходной сигнал, снимаемый с этих приемников, пропорционален производной от прироста температуры во времени при облучении в отличие от других тепловых приемников, реакция которых на излучение пропорциональна приросту температуры чувствительного элемента.

Работа ППИ заключается в том, что при изменении температуры пи-



роэлектрического кристалла изменяется его спонтанная поляризация P (рис. 18). Нецентросимметричные кристаллы (триглицинсульфат, титанат бария, ниобат, танталат и сульфат лития) используются в качестве чувствительных элементов ППИ. Приемный элемент совмещен с чувствительным элементом.

В свободном состоянии в отсутствие облучения в кристалле существует спонтанная поляризация, на гранях кристалла, перпендикулярных вектору P , распределены связанные заряды. Такие же по величине свободные заряды q натекают из внешней цепи и скапливаются у поверхностей кристалла, компенсируя разность потенциалов, созданную связанными зарядами. При изменении температуры пироэлектрического кристалла ППИ под действием облучения его температура повышается. Так как спонтанная поляризация пироэлектриков зависит от температуры, ее величина при нагреве уменьшается, уменьшается плотность связанных зарядов на гранях кристалла и освобождаются свободные заряды. При подключении кристалла к

нагрузочному резистору R (рис. 19) через него протекает пироэлектрический ток

$$I = \frac{dq}{dt} = \frac{d(PS)}{dt} = S \frac{dP}{dt} \frac{dT}{dt} = S\gamma \frac{dT}{dt},$$

где S – площадь поверхности кристалла, γ – пироэлектрический коэффициент. Величина этого тока пропорциональна падающей на ППИ мощности излучения.

Пироэлектрические приемники

излучения являются термочувствительными генераторами тока в отличие от болометров и термоэлементов (первые из них являются терморезисторами, вторые – генераторами напряжения).

Особенности пироприемников

1. Не может регистрировать постоянную мощность, так как ток течет только при изменении температуры.
2. Является чрезвычайно быстродействующим (так как сигнал пропорционален изменению температуры).
3. Очень чувствителен к изменению давления из-за пьезоэлектрического эффекта (появления связанных зарядов на гранях кристалла при его сжатии).

На пироэлектрическом эффекте создано столько различных типов приемников и преобразователей изображения, сколько было сделано на других тепловых эффектах вместе взятых за всю историю существования тепловых приемников излучения. Наиболее распространенными являются одноэлементные ППИ. Наилучшая чувствительность достигнута на триглицинсульфатных ППИ, легированных L - α аланином. Максимальное быстродействие получено на монокристаллах танталата лития (~ 170 пс).

Полостные ППИ (примеры приведены на рис. 20) создали основу

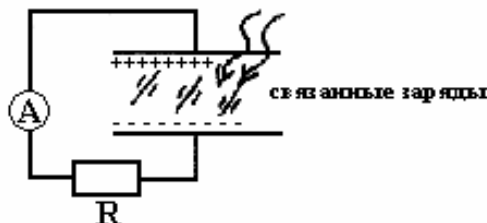


Рис. 19

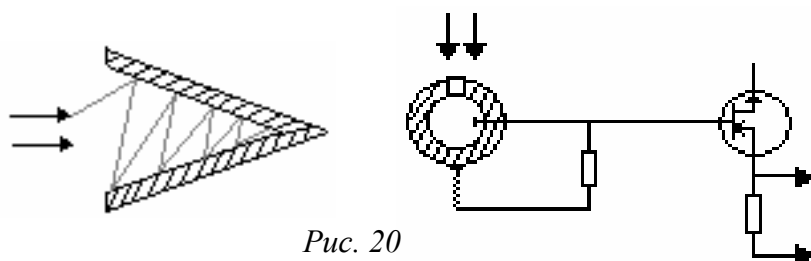


Рис. 20

быстродействующей радиационной калориметрии – одному из основных применений ППИ. Важной особенностью работы этих ППИ является воз-

возможность реализовать так же как и для калориметров метод электрического замещения.

Пирозлектрические координатные ППИ явились первыми в мировой практике неселективными датчиками положения. Координатные ППИ позволяют совместить в одном элементе функции анализатора оптической системы и приемника. В настоящее время известны следующие типы координатных ППИ: с разными электродами, с переменной толщиной чувствительного элемента, с анизотропией спонтанной поляризации.

3.2. Фотоэлектрические приемники (фотонные)

В фотоэлектрических приемниках излучения фотоны падающего потока излучения непосредственно взаимодействуют с электронами чувствительного элемента приемника и переводят их в возбужденное состояние. Это электровакуумные или полупроводниковые приборы, преобразующие энергию электромагнитного излучения оптического или инфракрасного диапазона в электрическую.

Фотонные приемники излучения подразделяют на приемники с внешним и внутренним фотоэффектом. На внешнем фотоэффекте основаны фотоэмиссионные приемники излучения: фотоэлементы, фотоэлектрические умножители. Внутренний фотоэффект используют фотоэлектрические полупроводниковые приемники излучения: фотодиоды, фоторезисторы.

Как известно, внешний фотоэффект наблюдается при освещении металлов, их сплавов и некоторых полупроводниковых соединений и сводится к вырыванию с их поверхности электронов. Энергия вырванных электронов определяется уравнением Эйнштейна:

$$h\nu = A_{\text{ВЫХ}} + \frac{m v_{\text{max}}^2}{2},$$

Из этого уравнения следует, что внешний фотоэффект происходит лишь при частотах $\nu > \nu_0 = A_{\text{ВЫХ}}/h$. Длина волны $\lambda_0 = c/\nu_0 = hc/A_{\text{ВЫХ}}$ определяет красную границу внешнего фотоэффекта. Например, для цезия $\lambda_0 = 900$ нм, для меди $\lambda_0 = 300$ нм, для кислородноцезиевого катода (окисел Cs_2O с избыточным металлическим цезием на серебряной подложке) $\lambda_0 = 1300$ нм.

Фотоэлементы

Фотоэлектрический приемник – фотоэлемент – обычно представляет собой вакуумную колбу, на одну из стенок которой наносится светочувствительный слой К (фотокатод) и внутри располагается анод А. Фотоэлемент включается в цепь с источником напряжения E и нагрузочным резистором R_H . При облучении катода потоком света Φ в цепи возникает ток и на сопротивлении появляется разность потенциалов, которая измеряется тем или иным способом.

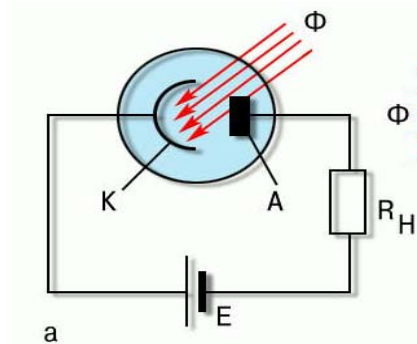


Рис. 21.

Основной характеристикой фотокатода является его квантовый выход – отношение количества вырванных фотоэлектронов к количеству падающих на поверхность фотокатода фотонов. Для данного материала фотокатода квантовый выход зависит от частоты фотонов, угла падения света, характера его поляризации, температуры катода. Зависимость квантового выхода от длины волны может характеризоваться наличием нескольких максимумов. Для чистых металлов квантовый выход для видимой и близкой ультрафиолетовой области не превышает нескольких сотых и только в области более короткого ультрафиолета достигает значений $\sim 0,2$. Таким образом, внешний фотоэффект весьма селективен по отношению к частоте (длине волны) падающего света. Чувствительность зависит от состояния поверхности, от температуры окружающей среды, и изменяется с течением времени под действием излучения (старение фотокатода). Все это приводит к тому, что приемники этой группы нельзя использовать как эталонные, а только для относительных измерений.

Фотоэлементы используют в схемах автоматики и контрольно-измерительных устройствах, источниками света в которых служат обычно лампы накаливания.

Быстродействие (постоянная времени) фотоэлементов складывается из времени фотоэмиссии ($\tau_{\phi} \sim 10^{-12}$ с) и времени пролета электронов от катода к аноду ($\tau_{\pi} \sim 10^{-10}$ с). Последнее зависит от скорости движения электронов. Чем больше напряжение между анодом и катодом, тем меньше постоянная времени фотоэлемента. Для обычных фотоэлементов напряжение составляет от нескольких сотен вольт до полутора киловольт.

Фотоэлектронные умножители

Фотоэлектронные умножители (ФЭУ) – это усилители слабых фото-токов, действие которых основано на вторичной электронной эмиссии. Конструктивные узлы ФЭУ: фотокатод, диоды и анод-коллектор (рис. 22).

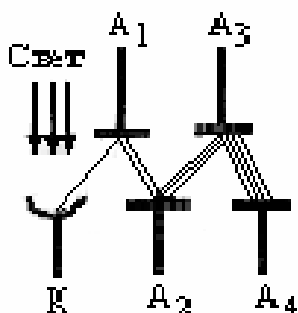


Рис. 22.

Основным достоинством ФЭУ является высокая пороговая чувствительность в ультрафиолетовой, видимой и ближней инфракрасной областях спектра, позволяемая регистрировать даже единичные электроны. Быстродействие ФЭУ несколько хуже, чем у фотоэлементов. К недостаткам ФЭУ можно отнести сложность питания, высокие напряжения. Используются для измерения формы импульса, для детектирования слабых сигналов.

Фотодиоды и фоторезисторы

Работа приемников этого типа основана на явлении внутреннего фотоэффекта, в результате которого происходит уменьшение сопротивления полупроводника под влиянием освещения. Наиболее употребительными являются следующие полупроводниковые соединения: PbS, PbSe, PbTe, Bi₂S, Tl₂S, InSb, а также Si и Ge с примесями Au, Cu, Zn и других металлов. Полупроводники характеризуются наличием энергетических зон – валентной и проводимости, между которыми лежит запрещенная зона. Валентная зона заполнена электронами. Под влиянием излучения, энергия квантов которого больше энергетической ширины запрещенной зоны, происходит внутренний фотоэффект – электрон из валентной зоны переходит в зону проводимости. В результате появляется пара носителей тока – электрон и дырка. Это ведет к уменьшению сопротивления полупроводника.

Внутренний фотоэффект, как и внешний, характеризуется наличием красной границы. Для большинства чистых полупроводников ширина запрещенной зоны составляет величину порядка 1÷2 эВ, чему соответствуют значения $\lambda_0 \sim 1200 \div 600$ нм. В примесных полупроводниках наличие примесей ведет к появлению добавочных энергетических уровней, расположенных между зонами валентной и проводимости вблизи одной из зон.

Благодаря этому энергия активации в таких полупроводниках оказывается малой, а красная граница фотоэффекта возрастает до 5÷10 мкм, а для некоторых материалов даже до 100 мкм.

Обычно фотосопротивления изготавливаются в виде тонкого слоя полупроводника, наносимого на диэлектрическую подложку. К концам полупроводника подводятся электроды. Фотосопротивление включается последовательно с нагрузочным сопротивлением в цепь, содержащую источник напряжения. В качестве измеряемого сигнала используется разность потенциалов, возникающая на концах нагрузочного сопротивления.

Постоянная времени фотосопротивлений достаточно велика – порядка $10^{-3} \div 10^{-5}$ с.

Фотодиоды представляют собой два соприкасающихся полупроводника, один из которых обладает дырочной проводимостью, а другой – электронной. Граница между такими полупроводниками пропускает электроны в одном направлении, а дырки – в другом. При освещении светом электронный полупроводник заряжается положительно, а дырочный – отрицательно. Если к обоим полупроводникам подвести электроды и замкнуть цепь, то в ней возникает электрический ток. Благодаря своей высокой чувствительности и простоте (не требуется источник внешней ЭДС) приемники с запирающим слоем находят широкое применение. Приемники с запирающим слоем используются также в схеме с внешним источником ЭДС, обратного направления по отношению к фотоЭДС.

Фотодиоды и фоторезисторы не требуют больших напряжений питания, но проигрывают по быстродействию фотоэлементам и ФЭУ.

Фоточувствительные приборы с зарядовой связью

Фоточувствительные приборы с зарядовой связью (ФПЗС) – это многоэлементные фотоэлектрические приемники излучения, в которых световой сигнал в результате внутреннего фотоэффекта преобразуется в электрический заряд и реализован эффективный вывод накопленных зарядов со всех приемных элементов через одно выходное устройство. Количество приемных элементов в линейных ФПЗС составляет от 512 до нескольких тысяч, а в матричных ФПЗС – до 10^6 . Приемными элементами, как правило, служат фотодиоды.

Рассмотрим работу одного из основных элементов ФПЗС – МОП-емкости (металл, окисел, полупроводник). Это конденсатор (рис. 23), образованный металлическим электродом, слоем диэлектрика толщиной $d_d = 0,1$ мкм и Si – полупроводником *p*-типа толщиной $d_n = 7 \div 10$ мкм.

Прикладывая к электродам напряжение разной полярности можно управлять этой емкостью. Режимы работы МОП-емкости:

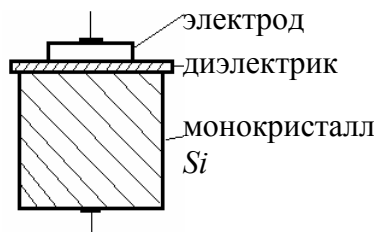


Рис. 23.

а) отрицательное смещение на электроде (рис. 24,а). Электрод заряжается отрицательно, при подаче отрицательного потенциала. Отрицательный заряд притягивает дырки, которые аккумулируются в узком слое $d_{ак} = 0,8$ нм под диэлектриком. Емкость в целом равна емкости полупроводника;

б) небольшое положительное смещение на электроде (рис. 24,б). Положительный заряд притягивает электроны, но их в Si полупроводнике p –

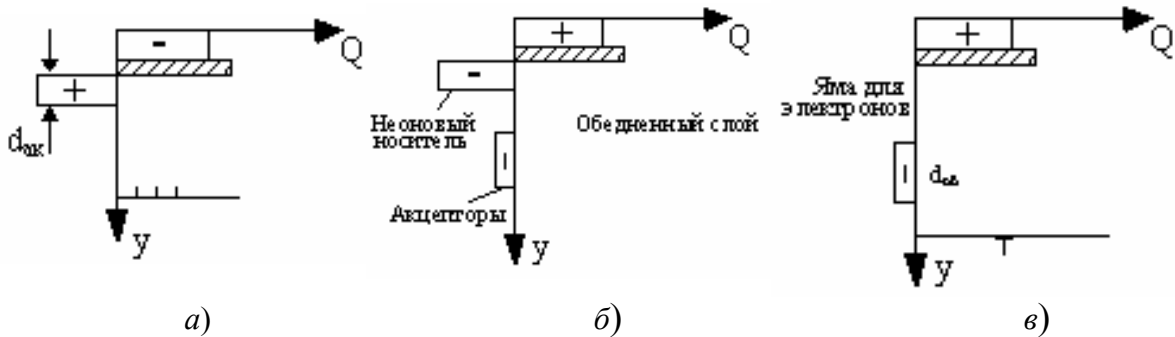


Рис. 24.

типа мало, они собираются под диэлектриком, а дырки уходят из кристалла Si, в результате акцепторы оголяются. Отрицательный заряд сосредоточен по объему полупроводника;

в) большое положительное смещение на электроде (рис. 24,в). Дырки уходят во внешнюю цепь, формируется обедненный слой, который препятствует попаданию электронов к диэлектрику, образуется яма для электронов. Источники электронов, заполняющих яму:

1. Тепловая генерация электронно-дырочных пар. Так как температура кристалла отлична от нуля, некоторые электроны переходят из валентной зоны в зону проводимости, появляются свободные электроны и дырки. Этот заряд в яме – темновой заряд, время τ заполнения ямы $\approx 10 \div 100$ с, зависит от чистоты полупроводника и в значительной степени от температуры, при охлаждении кристалла τ уменьшается.

2. Внутренний фотоэффект при облучении светом.

3. Поступление электронов из прилегающих областей кристалла.

Когда ряд МОП-емкостей располагаются на расстоянии $0,2 \div 1$ мкм, их электрические поля влияют друг на друга, появляется возможность управлять перетеканием зарядов от одной емкости к другой (соседней) путем синхронного изменения напряжения на соответствующих электродах (рис. 25). Такое перемещение зарядов вдоль кристалла происходит благодаря *зарядовой связи* близкорасположенных МОП-емкостей. Если на электроде первой емкости большое положительное смещение, а на второй и третьей – небольшое положительное смещение, то потенциальная яма для электронов находится под первым электродом. При изменении величины напряжения – подаче на первую емкость небольшого смещения, а на вторую – большого заряды из первой емкости переместятся во вторую. Структурная схема линейного

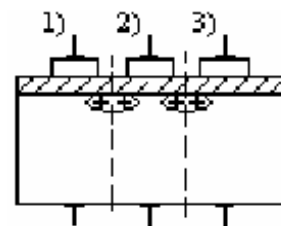


Рис. 25

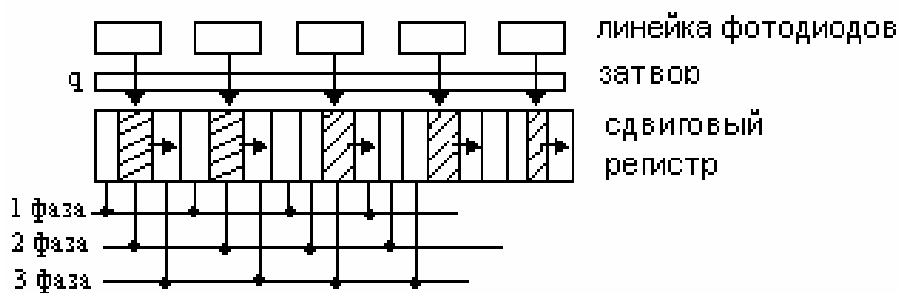


Рис. 26

ФПЗС показана на рис. 26. Приемным элементом являются фотодиоды, расположенные в линию. Когда затвор открывается, образованные в результате внутреннего фотоэффекта заряды сбрасываются в выходной регистр, представляющий собой цепочку МОП-емкостей. Под каждым фотодиодом расположены три МОП-емкости, управляемые сдвинутыми по фазе последовательностями электрических импульсов. Пока в оптической секции линейка фотодиодов накапливает заряд, в сдвиговом регистре осуществляется перемещение сброшенных зарядов в выходное устройство.

Линейные ФПЗС широко используются в качестве координатно-чувствительных датчиков, в спектральных приборах. Матричные ФПЗС служат для преобразования изображений.

Библиографический список

1. Хирд, Г. Измерение лазерных параметров / Г. Хирд. – М. : Наука, 1970. – 534 с.
2. Измерение энергетических параметров и характеристик лазерного излучения / под ред. А.Ф. Котюка. – М. : Наука, 1981. – 189 с.
3. Справочник по лазерам. В 2 т. Т. 2. / под ред. А. М. Прохорова. – М. : Сов. радио, 1978. – 400 с.
4. Пресс, Ф. П. Фоточувствительные приборы с зарядовой связью / Ф. П. Пресс. – М. : Радио и связь, 1991. – 261 с. – ISBN 5-25600-855-2.
5. Фриш, С. Э. Оптические методы измерений : учеб. пособие. В 3 ч. Ч. 1 / С. Э. Фриш. – Л., 1976. – 126 с.
6. Измерение параметров приемников оптического излучения / под ред. Д. Н. Курбатова. – М. : Радио и связь, 1983. – 318 с.
7. Эпштейн, М. И. Измерение оптического излучения в электронике / М. И. Эпштейн. – М. : Энергия, 1975. – 248 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ	4
1.1. Световые величины	6
1.2. Температура источника света	7
2. ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ	8
2.1. Лампы накаливания	8
2.2. Импульсные источники сплошного спектра.....	9
2.3. Источники дискретного спектра	9
2.4. Лампы с полым катодом.....	10
2.5. Высокочастотные безэлектродные лампы ВСБ-2.....	12
3. ПРИЕМНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ	13
3.1. Тепловые приемники излучения	15
3.1.1. Измеритель мощности оптический (ИМО-2).....	19
3.1.2. Калориметр ТПИ-2.....	21
3.1.3. Приемник Голея	21
3.1.4. Болометры	21
3.1.5. Термоэлементы.....	25
3.1.6. Пирозлектрические приемники.....	26
3.2. Фотоэлектрические приемники (фотонные).....	28
Библиографический список	34

ИСТОЧНИКИ И ПРИЕМНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ
Конспект лекций

Составитель
ЗАЯКИН Андрей Анатольевич

Ответственный за выпуск - зав. кафедрой профессор С.М. Аракелян

Редактор Е.В.Невская
Корректор
Компьютерная верстка А. А. Заякина, С.В. Павлухиной.

ЛР № 020275. Подписано в печать 02.06.05.
Формат 60x84/16. Бумага для множит. техники. Гарнитура Таймс
Печать на ризографе. Усл. печ. л. Уч.-изд. л. . Тираж 100 экз.

Заказ
Редакционно-издательский комплекс
Владимирского государственного университета.
600000, Владимир, ул. Горького, 87.