

ЗНАНИЕ

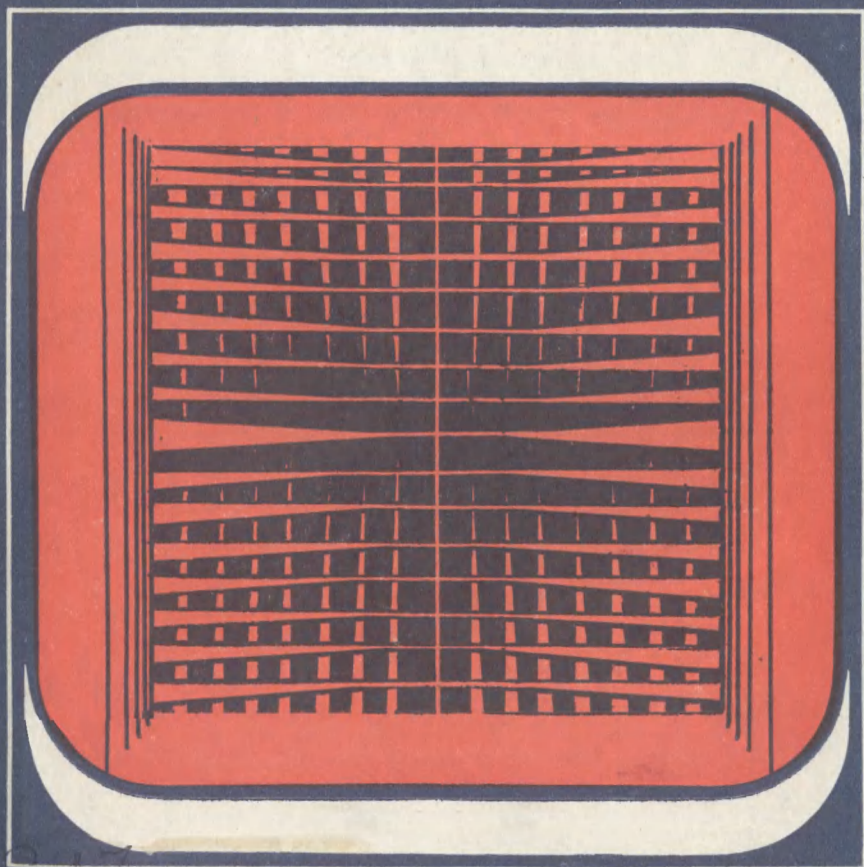
НОВОЕ
В ЖИЗНИ,
НАУКЕ,
ТЕХНИКЕ

СЕРИЯ
ФИЗИКА

8'79

**В.М. Мальцев
В.А. Селезнев
В.А. Андреев**

ОПТИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ



НОВОЕ
В ЖИЗНИ,
НАУКЕ,
ТЕХНИКЕ

Серия
«Физика»,
№ 8, 1979 г.

Издается
ежемесячно
с 1946 г.

В. М. Мальцев,
доктор физико-математических наук
В. А. Селезнев,
кандидат физико-математических наук
В. А. Андреев

ОПТИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Издательство
«Знание»
Москва
1979



Scan AAW

Мальцев В. М. и др.
M21 **Оптическое излучение. М., «Знание», 1979.**

64 с. (Новое в жизни, науке, технике. Серия «Физика», 8. Издается ежемесячно с 1946 г.)

Перед загл. авт.: В. М. Мальцев, В. А. Селезнев, В. А. Андреев.

Брошюра знакомит с теоретическими основами и техническим устройством оптических излучателей. Авторы излагают физические принципы оптического излучения. Рассматриваются различные виды излучения — тепловое, люминесцентное и лазерное — и описывающие их закономерности. Описываются современные типы световых излучателей, отличающихся способом генерации светового излучения. Подробно рассмотрены электронагревные излучатели, газоразрядные лампы, люминесцентные излучатели, лазеры, а также источники, использующие химическую энергию.

Материал рассчитан на широкий круг читателей.

20408

22.34

Физические основы оптического излучения

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

При решении современных научных и технических проблем во многих случаях приходится иметь дело с излучением: при анализе веществ по поглощаемому или испускаемому спектру, при исследованиях свойств излучения или явлений взаимодействия излучения с веществом, при использовании излучения для различных измерений и т. д.

В природе происходит постоянный обмен энергией между различными телами. Одним из способов выделения телом накопленной в нем энергии является процесс излучения. Самые разнообразные явления — радиоволны и идущие из космоса γ -лучи, излучение Солнца, лучи Рентгена — оказались одинаковыми по своей природе, все они представляют собой электромагнитные волны.

Полный спектр излучения содержит все типы электромагнитных излучений. В зависимости от длины волны меняются характер излучения и его свойства. Весь спектр можно разделить на определенные области в зависимости от применяемых источников излучения, методов его разложения в спектр и методов регистрации. Наиболее длинноволновая область спектра с длинами волн от десятков километров до долей миллиметра соответствует радиоволнам. Более короткие волны расположены в микроволновой области от десятков сантиметров до десятых долей миллиметра. В этой области так же, как и в области радиоволн, для получения и регистрации электромагнитных волн применяют радиотехнические средства. Далее расположены наиболее коротковолновая, оптическая область спектра, инфракрасный, видимый и ультрафиолетовый его диапазоны. Излучение и поглощение света в оптической области связаны со строением отдельных атомов и молекул. К инфракрасной области относят излучение с длиной волны от

нескольких миллиметров до 0,75 мкм. Видимая область занимает участок спектра примерно от 0,4 до 0,75 мкм. Электромагнитное излучение, соответствующее этой области, воспринимается глазом человека как видимый свет различных цветов в зависимости от длины волны. Ультрафиолетовая область спектра примыкает к фиолетовому участку видимой области и продолжается до рентгеновских лучей. Ее разделяют на три участка: ближний и средний ультрафиолет (0,4—0,23 мкм), дальний (0,23—0,185 мкм) и вакуумный (0,185—0,05 мкм). За областью вакуумного ультрафиолета следует рентгеновский диапазон, в котором излучение и поглощение связаны с изменением внутреннего строения атомов. За рентгеновской расположена область γ -лучей, испускаемых веществом при различных ядерных превращениях.

Электромагнитные волны существенно различных длин волн отличаются между собой как по механизму их возникновения, так и по результату их взаимодействия с веществом. По этим признакам электромагнитные волны в зависимости от длины волны делятся на области, совокупности которых представляют собой спектр электромагнитных волн. Оптическим излучением называются электромагнитные волны с длиной волны в интервале 0,01—340 мкм.

Источником оптического излучения принято называть физическое тело, преобразующее любой вид энергии в энергию электромагнитных излучений оптического диапазона спектра. По способу генерирования излучения все оптические излучатели можно разделить на три типа. К первому относятся источники, излучение которых происходит за счет тепла того или иного тела. Такой способ генерирования оптического излучения называется тепловым (или температурным), а сами источники — тепловыми излучателями. Все тела с температурой выше абсолютного нуля являются источниками теплового излучения. При этом излучение энергии связано с переходом этого тела в состояние термодинамического равновесия с окружающей средой.

Кроме теплового, некоторые тела в определенных условиях могут испускать излучение, называемое люминесцентным. Разновидностью люминесцентного излучения является индуцированное излучение квантовых систем, в которых образуется инверсия населенностей энергетических уровней (лазерное излучение).

К третьему типу относится способ, в котором сочетаются механизмы излучения обоих указанных выше способов генерации оптического излучения. Типичный пример такого рода оптических излучателей — электрическая дуга высокой интенсивности, излучение анода которой является тепловым, а межэлектродное свечение — люминесцентным.

Рассмотрим, как генерируется оптическое излучение. Атомы, молекулы и кристаллы находятся обычно в нейтральном состоянии или на нижнем энергетическом уровне. При получении извне энергии нейтральный атом, молекула или кристалл могут ее поглотить, повысив тем самым свой запас потенциальной энергии, т. е. перейти на новый энергетический уровень. Такие атом, молекула или кристалл называются «возбужденными». Установлено, что атомы не могут поглощать произвольные количества сообщаемой им извне энергии, т. е. не могут иметь любой запас потенциальной энергии. Каждый атом характеризуется лишь несколькими возможными энергетическими уровнями, количество которых тем больше, чем сложнее его структура.

Все атомы одного элемента в невозбужденном состоянии не отличаются друг от друга и имеют одинаковую внутреннюю энергию (различие между атомами разных изотопов одного элемента учитывать не будем). Переход из возбужденного состояния в некоторое промежуточное или основное приводит к испусканию кванта излучения — фотона. При этом в спектре возникает линия излучения. Длина испускаемой линии (λ) связана с разностью энергий уровней, между которыми происходит переход ΔE , соотношением

$$\Delta E = \hbar c / \lambda,$$

где \hbar — постоянная Планка, c — скорость света.

Присутствие в спектрах излучения атомов только некоторых определенных линий связано с тем, что атом в возбужденном состоянии может иметь только ряд вполне определенных значений внутренней энергии. Энергия молекулы складывается из энергии электронов, входящих в состав молекулы, энергии внутримолекулярных колебаний и вращения молекулы. Такая тройная структура молекулярного спектра соответствует тройной структуре энергетических состояний молекулы.

Поэтому молекулы и кристаллы характеризуются сериями энергетических уровней. Спектр излучения, испускаемого молекулой, состоит из системы полос, каждая из которых складывается из отдельных спектральных линий.

Если изменяется только вращательное состояние молекулы, она испускает излучение, соответствующее дальней инфракрасной области спектра. При изменении энергии колебаний излучение происходит в диапазоне спектра 1—50 мкм. Уменьшение энергии молекулы в результате перехода электрона на низшие уровни вызывает излучение, находящееся в диапазоне ближнего инфракрасного, видимого или ультрафиолетового излучения. Конкретное значение энергетического уровня, до которого может быть возбуждена данная молекула, зависит от ее теплового состояния и взаимодействия с соседними молекулами и атомами. Тепловое движение вызывает непрерывный обмен энергией между соседними молекулами, ведущий к появлению всевозможных возбужденных энергетических состояний, причем вероятность появления непрерывных энергетических состояний определяется температурой тела.

В обмене энергией между отдельными молекулами и атомами тела также принимает участие излучение. Энергия излучения внутренних молекул или атомов твердого тела поглощается соседними молекулами или атомами, которые, в свою очередь, излучают. Таким образом, существует взаимосвязь между полем излучения и излучающими молекулами и атомами. Возникновение всевозможных энергетических состояний ведет к испусканию электромагнитного излучения с различными длинами волн, образующего сплошной непрерывный спектр.

Рассмотренные элементарные акты возбуждения тела и испускания излучения одинаковы при тепловом, люминесцентном и лазерном способах генерирования оптического излучения. Однако оптическое излучение при тепловом и люминесцентном способах генерации некогерентно, т. е. электромагнитные волны испускаются оптическими излучателями в разное время и не связаны между собой по частоте и фазе. Только с созданием оптических квантовых генераторов удалось получить источник когерентного излучения в оптическом диапазоне спектра.

Энергия излучения и все связанные с ней величины

измеряются энергетическими величинами и единицами в зависимости от особенностей приемника, применяемого для измерений. Оптическое излучение принято характеризовать следующей системой величин и единиц. Основной величиной является переносимая излучением энергия Q , измеряемая в джоулях (Дж). Поток излучения называют его мощностью, энергию, переносимую за единицу времени, $\Phi = dQ/dt$, измеряемую в ваттах (Вт). Энергетическая сила света (сила излучения) I есть отношение потока излучения $d\Phi$, исходящего от источника и распространяющегося внутри телесного угла $d\Omega$, к этому углу: $I = d\Phi/d\Omega$. Единицей энергетической силы света является ватт на стерадиан (Вт/стер). Энергетическая яркость L есть отношение энергетической силы света I , излучаемой в данном направлении элементом dA поверхности источника, к площади проекции этого элемента поверхности на плоскость, перпендикулярную направлению излучения (Θ —угол между этим направлением и нормалью к dA): $L = dI/dA \cos\Theta = d^2\Phi/d\Omega dA \cos\Theta$. Энергетическая яркость измеряется в ваттах на стерадиан и на квадратный метр (Вт/стер·м²).

Из определения энергетической яркости следует, что ее значение зависит от угла между нормалью к излучающей поверхности и направлением излучения. Однако некоторые источники оптического излучения имеют энергетическую яркость, не зависящую от этого направления. В таком случае говорят, что они подчиняются закону Ламберта, согласно которому энергетическая сила света излучающей поверхности пропорциональна косинусу угла между нормалью к излучающей поверхности и направлением излучения. Закон Ламберта строго справедлив лишь для абсолютно черного тела, а также для идеально рассеивающих или идеально матовых поверхностей.

В ряде случаев приходится рассматривать поверхностную плотность излучения, т. е. отношение потока излучения $d\Phi$, приходящегося на элемент поверхности dA , содержащий заданную точку, к площади этого элемента. Если поток излучения $d\Phi$ падает на поверхность dA , его поверхностная плотность называется энергетической освещенностью E : $E = d\Phi/dA$. Если поток $d\Phi$ испускается поверхностью dA , его поверхностная плотность называется энергетической светимостью M : $M = d\Phi/dA$. Единицей энергетической освещенности и энер-

гетической светимости является ватт на квадратный метр (Вт/м^2).

Энергетическая сила света, светимость и яркость характеризуют излучательные свойства источника оптического излучения. Спектр реальных тел может быть линейчатым, полосатым или сплошным. Источники с линейчатым спектром излучают только в пределах узких участков. У источников с полосатым спектром излучение происходит в пределах достаточно широких участков спектра—полос. Оптические источники теплового излучения и люминесценции имеют сплошные спектры. В связи с этим возникает необходимость введения спектральных характеристик излучения.

Этими характеристиками являются спектральные плотности соответствующих энергетических величин, представляющие собой отношения этих величин, взятых в бесконечно малом спектральном интервале от λ до $\lambda + d\lambda$ к ширине этого интервала $d\lambda$. Таковы спектральные плотности потока излучения $\Phi_\lambda = d\Phi/d\lambda$ (Вт/мкм), энергетической силы света $I_\lambda = dI/d\lambda$ ($\text{Вт/стер}\cdot\text{мкм}$), энергетической светимости $M_\lambda = dM/d\lambda$ ($\text{Вт/м}^2\cdot\text{мкм}$) и энергетической яркости $L_\lambda = dL/d\lambda$ ($\text{Вт/стер}\cdot\text{м}^2\cdot\text{мкм}$). Зависимость спектральной плотности данной энергетической величины от длины волны называется ее спектральным распределением.

Если поток энергии Φ падает на поверхность тела, то одна часть его, Φ_r , отражается, другая, Φ_τ , проходит сквозь тело и в зависимости от его коэффициента преломления изменяет свое направление, а третья, Φ_α , поглощается телом. Отношение потока энергии, прошедшего сквозь тело, к падающему называется коэффициентом пропускания $\tau = \Phi_\tau / \Phi$, отношение потока энергии, отраженного от тела, к падающему — коэффициентом отражения $\rho = \Phi_r / \Phi$, отношение поглощенного потока энергии к падающему — коэффициентом поглощения $\alpha = \Phi_\alpha / \Phi$. Поскольку полный поток энергии есть сумма отраженного, прошедшего и поглощенного потоков, то между ρ , τ и α существует зависимость $\rho + \tau + \alpha = 1$, при этом для тела, не пропускающего излучение, $\rho + \alpha = 1$.

Реальные тела отражают, поглощают и пропускают излучение чаще всего избирательно, по-разному для разных длин волн. В связи с этим используются понятия спектральных коэффициентов отражения $\rho(\lambda)$, поглощения $\alpha(\lambda)$ и пропускания $\tau(\alpha)$, которые выражают-

ся соответственно как $\rho(\lambda) = \Phi_{\lambda\rho} / \Phi_{\lambda}$, $\alpha(\lambda) = \Phi_{\lambda\sigma} / \Phi_{\lambda}$ и $\tau(\lambda) = \Phi_{\lambda\tau} / \Phi_{\lambda}$, где $\Phi_{\lambda\rho}$, $\Phi_{\lambda\sigma}$, $\Phi_{\lambda\tau}$, Φ_{λ} — монохроматические (при длине волны λ) потоки излучения — отраженный, поглощенный, пропущенный и падающий. Интегральные коэффициенты отражения, поглощения и пропускания могут быть получены из спектральных путем их интегрирования по некоторому участку или по всему спектру.

ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

В результате внутриатомных процессов, происходящих в каком-либо теле при его нагреве, тепловая энергия преобразуется в излучение, возникающее в результате изменения энергетических состояний электронов и ионов, входящих в состав излучающего тела.

О тепловом излучении говорят только в тех случаях, когда оно исходит от большого количества частиц, к которым может быть применено статистическое понятие теплового состояния и температуры. Этот вид излучения может существовать независимо от агрегатного состояния, в газообразных, жидких и твердых телах. Спектр вещества в газообразном состоянии, как правило, состоит из отдельных линий и полос, характерных для данного газа. Однако линейчатые спектры атомов и полосатые спектры молекул четко проявляются только в том случае, когда излучающее вещество находится в состоянии разреженного газа.

Спектр теплового излучения твердых и жидких тел непрерывен с более или менее ярко выраженными максимумами (одним или несколькими).

Основной особенностью теплового излучения является его равновесность: в системе тел, имевших разные начальные температуры, изолированной от окружающего пространства теплонепроницаемой оболочкой, в результате теплообмена устанавливается равновесная температура. Источником теплового излучения служит тепловая энергия тел. При излучении тела постепенно теряют ее и охлаждаются. Для того чтобы температура тела оставалась неизменной, необходимо восполнять эту потерю подведением энергии извне.

Спектральная плотность энергетической яркости $L_{\lambda}^0(\lambda, T)$ системы, находящейся в термодинамическом

равновесии, одинакова во всех ее точках, во всех направлениях и для любых значений длин волн и температур. Зависимость $L_{\lambda}^0(\lambda, T)$ сохраняется в такой системе для любых материалов, и в этом отношении она является универсальной функцией. Приравнявая излучаемый и поглощаемый (с учетом спектрального коэффициента поглощения) потоки энергии, получим соотношение, выражающее основной закон теплового излучения — закон Кирхгофа: отношение спектральной плотности энергетической яркости любого тела к его спектральному коэффициенту поглощения одинаково для любых тел и равно универсальной функции $L_{\lambda}^0(\lambda, T)$. Отсюда вытекает, во-первых, существование универсальной, не зависящей от природы тела функции излучения, и, во-вторых, количественная связь между поглощательными и излучательными свойствами любых тел (закон Кирхгофа справедлив не только для монохроматического, но и для интегрального излучения).

Согласно закону Кирхгофа универсальная функция излучения $L_{\lambda}^0(\lambda, T)$, зависящая только от длины волны и температуры, представляет собой спектральную плотность энергетической яркости тела, у которого коэффициент поглощения излучения равен единице. Таким идеальным излучателем принято считать так называемое черное тело. При любой заданной температуре в любом участке спектра он излучает в единицу времени больше энергии, чем любой другой тепловой излучатель такой же площади. В природе не известно ни одного вещества, которое могло бы быть принято за такой идеальный излучатель или поглотитель. Однако разработано много довольно полных моделей черных тел.

Как правило, моделью черного тела служит большая замкнутая оболочка с непрозрачными стенками, в одной из которых сделано небольшое отверстие. Излучение, вошедшее через отверстие в такую полость, будет испытывать многократные отражения от внутренних стенок, каждое из которых будет сопровождаться частичным поглощением. Чем выше коэффициент поглощения внутренней поверхности и чем меньше площадь отверстия по сравнению с общей площадью внутренней поверхности оболочки, тем меньшая доля вошедшего излучения сможет выйти обратно через отверстие. Если

внутри этой полости поддерживается постоянная температура, в ней устанавливается термодинамическое равновесие. Поэтому отверстие в модели черного тела, поглощающее практически все падающее на него излучение (независимо от длины волны, направления падения и состояния поляризации излучения), одновременно является источником, плотность излучения которого определяется универсальной функцией $L_{\lambda}^0(\lambda, T)$.

Математически выведенная Планком закономерность для спектральной плотности энергетической светимости черного тела выражается следующим уравнением:

$$M_{\lambda}^0(\lambda, T) = \pi L_{\lambda}^0(\lambda, T) = C_1 \lambda^{-5} [\exp(C_2/\lambda T) - 1]^{-1},$$

где $C_1 = 3,7413 \cdot 10^{-16}$ Вт·м² и

$$C_2 = (1,43880 \pm 0,00007) 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К};$$

$$h = (6,62517 \pm 0,00023) 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{с}.$$

Закон Планка представляет собой наиболее общее и полное описание излучения черного тела, из которого как следствия могут быть получены остальные законы излучения: формула Вина, законы смещения Вина и Стефана—Больцмана. Экспериментальная проверка полностью подтвердила правильность этой формулы, представляющей собой один из фундаментальных законов современной физики.

Из формулы Планка можно сделать ряд выводов. Во-первых, спектральная плотность энергетической светимости черного тела увеличивается при повышении температуры. Во-вторых, она распределяется по длинам волн неравномерно: для некоторой длины волны, которая однозначно связана с температурой черного тела, спектральная энергетическая светимость имеет наибольшее значение. И в-третьих, максимум энергетической светимости при повышении температуры смещается в сторону коротких длин волн.

В ряде случаев для расчетов используется формула Вина:

$$M_{\lambda}^0(\lambda, T) = C_1 \lambda^{-5} \exp(-C_2/\lambda T).$$

Она может быть получена из формулы Планка, если пренебречь единицей в знаменателе. Возникающая при этом ошибка тем меньше, чем больше значение $\exp(C_2/\lambda T)$ по сравнению с единицей. В частности, при

температурах до 4000 К для видимой и ультрафиолетовой области спектра ошибка при использовании формулы Вина вместо формулы Планка не превышает 1%.

Изменение температуры черного тела ведет не только к изменению абсолютных значений спектральной плотности энергетической светимости, но и сопровождается изменением положения максимумов кривых распределения энергетической светимости. Это перемещение максимумов при изменении температуры описывается законом смещения Вина $\lambda_m T = 2897,82 \text{ мкм} \cdot \text{К}$. Из него следует, что при увеличении температуры черного тела максимум его излучения смещается в сторону более коротких длин волн. Пользуясь этой формулой, можно определить длину волны, соответствующую максимальному излучению энергии в спектре, при данной температуре черного тела или его температуру, если известна длина волны, соответствующая максимуму излучения. Закон смещения Вина может быть выведен путем дифференцирования формулы Планка по длине волны и приравнивания производной нулю.

Следствием закона Планка является также закон Стефана—Больцмана. Он устанавливает зависимость полной энергетической светимости M° (или энергетической яркости L°) черного тела от его температуры T и может быть получен интегрированием формулы Планка в пределах от $\lambda_1 = 0$ до $\lambda_2 = \infty$:

$$M^\circ(T) = \pi L^\circ(T) = \sigma T^4,$$

где $\sigma = (5,67032 \pm 0,00071) 10^{-8} \text{ Вт/м}^2\text{К}^4$ — постоянная Стефана—Больцмана. Таким образом, суммарная энергетическая светимость (или энергетическая яркость) черного тела пропорциональна четвертой степени его температуры.

Все тела, коэффициент поглощения которых меньше единицы, относятся к категории нечерных тел. Таковы практически все реальные тела независимо от их агрегатного состояния.

В то время как излучение черного тела полностью и однозначно определяется его температурой, интенсивностью излучения реальных тел зависит не только от их температуры, но и от их излучательной способности, которая, в свою очередь, определяется материалом, оптическими свойствами поверхности и другими факторами. Для реальных тел эти зависимости не могут быть

выражены теоретически, за исключением отдельных случаев. Поэтому для реальных материалов и тел приходится пользоваться эмпирически полученными закономерностями. При этом стремятся выразить излучательные свойства реальных тел и материалов через соответствующие характеристики черного тела. Для этой цели широко используется закон Кирхгофа, связывающий оптические характеристики реальных тел с их излучательными способностями и излучением черного тела. Излучение, испускаемое реальным телом, может быть выражено как некоторая доля излучения, которое испускается геометрически идентичным черным телом, находящимся при той же температуре. Эта доля называется излучательной способностью черного тела. Из закона Кирхгофа следует связь между излучательной способностью реального тела и его коэффициентами поглощения $\varepsilon_T = \alpha$ и $\varepsilon(\lambda) = \alpha(\lambda)$. Здесь ε_T — интегральная излучательная способность, а $\varepsilon(\lambda)$ — спектральная излучательная способность реального тела.

В соответствии с характером зависимости коэффициента излучения $\varepsilon(\lambda)$ от длины волны реальные тела делятся на тела с селективным излучением и серые. Спектральный коэффициент тел с селективным излучением изменяется с длиной волны. Таковы, например, различные металлы с неокисленной поверхностью. Тела, спектральный коэффициент излучения которых одинаков для всех длин волн, называются серыми. Из самого определения следует, что спектральный коэффициент излучения серого тела равен его интегральному коэффициенту излучения. В природе не существует тел, которые обладали бы такими свойствами во всей оптической области спектра, однако в отдельных диапазонах длин волн (различных для разных тел) многие тела можно отнести к разряду серых. Таковы, например, твердые тела с шероховатой поверхностью, прежде всего диэлектрики, полупроводники и окисленные металлы.

Энергетическую светимость любого реального тела M можно определить как некоторую часть энергетической светимости черного тела M^0 при той же температуре, вводя в законы излучения черного тела спектральный $\varepsilon(\lambda)$ и интегральный ε_T коэффициенты излучения. Введя в формулу Планка спектральный коэффициент излучения, можно определить спектральную плотность энергетической светимости M_λ реального тела:

$M_\lambda = \varepsilon(\lambda) M_\lambda^0$. Энергетическая светимость M реального тела определяется при введении величины интегрального коэффициента излучения в выражение закона Стефана—Больцмана: $M = \varepsilon_T \sigma T^4$.

Поток излучения Φ , испускаемый реальным телом, определяется выражением $\Phi = \int M(A_1) dA_1$, где $M(A_1)$ — функция, определяющая распределение энергетической светимости по поверхности A_1 . Если все участки излучающей поверхности A_1 данного тела имеют одинаковую температуру T и интегральный коэффициент излучения ε_T , то выражение для потока излучения реального тела примет вид: $\Phi = A_1 M = A_1 \varepsilon_T T^4$. Это выражение определяет поток излучения, испускаемой реальным телом в окружающую среду с температурой 0 К. При температурах среды T_2 , больших 0 К, излучающее тело с температурой T_1 будет поглощать часть энергии, получаемой им от окружающей среды, в связи с чем поток его излучения выразится как $\Phi = A_1 \varepsilon'_T (T_1^4 - T_2^4)$, где ε'_T — среднее арифметическое значение интегрального коэффициента излучения для температур T_1 и T_2 .

Температура является одним из основных параметров многих физико-химических процессов. Ясно, что физическое определение температуры должно основываться на такой физической величине, характеризующей состояние тела, которая была бы автоматически одинаковой у любых двух тел, находящихся в тепловом равновесии друг с другом. Оказывается, что этим свойством обладает средняя кинетическая энергия поступательного движения частиц (молекул или атомов) тела.

Принято определять температуру T как $2/3$ от средней кинетической энергии поступательного движения

частиц тела, т. е. $T = \frac{2}{3} \frac{\overline{mv^2}}{2} = \frac{1}{3} \overline{mv^2}$, где m — масса, v — скорость частицы, а черта над выражением означает, что должно быть взято его среднее значение.

Согласно данному определению температура имеет размерность энергии, а потому может измеряться в тех же единицах, что и энергия, например, в джоулях. Однако как единица измерения температуры джоуль оказывается крайне неудобным прежде всего потому, что энергия теплового движения частиц по сравнению с ним ничтожна. Кроме того, непосредственное измерение тем-

пературы как энергии частиц вообще очень затруднительно. По этим причинам практически пользуются удобной условной единицей измерения температуры — градусом, определяемым как одна сотая часть разности между температурами кипения и замерзания чистой воды при атмосферном давлении.

При изучении реальных тел и описании их оптических характеристик пользуются свойствами моделей черного тела. Одним из возможных путей в этом направлении является введение понятия эквивалентных температур, которые позволяют оценивать соответствующие оптические свойства реальных излучателей через излучение черного тела. Используются энергетическая (радиационная), яркостная и цветовая эквивалентные температуры.

Энергетическая (радиационная) температура $T_{\text{эн}}$ — такая, при которой энергетическая светимость черного тела равна энергетической светимости исследуемого реального тела, имеющего истинную температуру T . Поэтому $T = T_{\text{эн}} / (\epsilon_T)^{1/4}$.

Яркостная температура $T_{\text{я}}$ — такая, при которой спектральная плотность энергетической яркости черного тела в узкой области спектра равна спектральной плотности энергетической яркости исследуемого реального тела в той же области спектра при истинной температуре T . Из определения яркостной температуры и формулы Вина имеем: $1/T - 1/T_{\text{я}} = (\lambda/C_2) \ln \epsilon(\lambda)$.

Цветовая температура $T_{\text{ц}}$ — такая, при которой цветность излучения рассматриваемого реального тела при его истинной температуре T . Исходя из определения цветовой температуры численно равна температуре черного тела, при которой отношения спектральных плотностей энергетических яркостей обоих тел для значений длины волны λ_1 и λ_2 ($\lambda_2 > \lambda_1$) равны.

Используя формулу Вина, можно показать, что соотношение между цветовой температурой реального тела и его истинной температурой дается выражением:

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\text{ц}}} = \ln(\epsilon_{\lambda_1} / \epsilon_{\lambda_2}) / C_2 \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right),$$

где ϵ_{λ_1} и ϵ_{λ_2} — спектральные коэффициенты излучения исследуемого реального тела для длин волн λ_1 и λ_2 .

ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ

Одним из способов генерирования излучения в оптическом диапазоне спектра является люминесценция. Она возбуждается за счет любого вида энергии, кроме тепловой. Под действием света, электрического тока, химических реакций и других агентов тепловое равновесие нарушается и частицы вещества переводятся с нижних уровней энергии на более высокие. В результате этого на некоторых возбужденных уровнях энергии накапливается избыточное (по сравнению с равновесным) число частиц. Распределение же частиц по другим уровням при этом остается практически равновесным. Поэтому наряду с тепловым излучением появляется дополнительное свечение (избыточное над тепловым) — люминесценция.

Различие между тепловым излучением и люминесценцией состоит в том, что поглощенное веществом излучение не идет на увеличение запаса тепла в нем, а удерживается в форме потенциальной энергии, которая затем, не переходя в тепловые колебания атомов, частично или полностью снова излучается. Таким образом, поглощающее вещество не взаимодействует совсем или слабо взаимодействует со своим окружением. Поглощенная энергия излучения не распределяется, как в случае теплового поглощения, по всем степеням свободы всех атомов и молекул и не пополняет тепловой запас тела.

После окончания внешнего воздействия люминесценция затухает в течение некоторого времени, называемого длительностью свечения τ . В зависимости от величины τ люминесценцию условно делят на флуоресценцию ($\tau < 10^{-8}$ с) и фосфоресценцию ($\tau > 10^{-8}$ с). Эта характеристика люминесценции позволяет отделить ее от других явлений вторичного излучения, таких, как отражение и рассеяние света, тормозное излучение заряженных частиц, вынужденное испускание и т. п.

Элементарные акты возбуждения и испускания излучения одинаковы в случае теплового излучения и люминесценции. Различие состоит лишь в относительном числе тех или иных энергетических переходов. Из определения люминесценции следует, что оно применимо только к телам, находящимся в состоянии термодинамического равновесия. В случае сильного отклонения от

равновесия говорить о тепловом излучении или люминесценции не имеет смысла.

Кроме основных признаков люминесценции есть еще побочные, которые помогают отделить ее от других видов излучения: люминесцентное излучение некогерентно и селективность его зависит от свойств излучающего вещества. В зависимости от характера физического процесса, ответственного за свечение вещества, различают самостоятельное, вынужденное и рекомбинационное свечение.

Самое кратковременное самостоятельное свечение возникает при переходе электрона из возбужденного состояния в невозбужденное под действием поля самой возбужденной частицы. Внешние поля на этот вид люминесценции влияния почти не оказывают.

При вынужденном свечении электрон с нормального невозбужденного уровня переходит на возбужденный уровень, а с него — не на невозбужденный, а на промежуточный метастабильный уровень, переход с которого в невозбужденное состояние маловероятен. Под действием тепловой энергии или соударений второго рода электрон переходит с метастабильного уровня опять на возбужденный уровень, с которого разрешен переход на невозбужденный уровень. Такое излучение имеет длительность на несколько порядков большую, чем при самостоятельном свечении.

Рекомбинационная люминесценция происходит вследствие воссоединения частиц, разделившихся при поглощении возбуждающей энергии. В газах может происходить рекомбинация радикалов и ионов, в результате которой образуется молекула в возбужденном состоянии. Последующий переход в основное состояние может сопровождаться люминесценцией. В кристаллических телах рекомбинационная люминесценция возникает при появлении неравновесных носителей заряда (электронов или дырок) под действием источника энергии. В кристаллах излучающим центром является ион металла. Переход его из возбужденного состояния в основное сопровождается излучением. Рекомбинационная люминесценция наблюдается в кристаллофосфорах и в полупроводниках, например германии и кремнии. При рекомбинационной люминесценции в процессе преобразования энергии участвует все вещество. Самостоятель-

ная и вынужденная люминесценция является отдельными этапами рекомбинационной люминесценции.

В зависимости от того, за счет какой энергии осуществляется возбуждение атомов или молекул, различаются фотолюминесценция, катодолюминесценция, электролюминесценция и хемилюминесценция. Существуют также и другие виды люминесценции, такие, как трибо-, био-, ионо-, кандолюминесценция и др.

При фотолюминесценции возбуждение вещества осуществляется электромагнитным излучением видимого, ультрафиолетового или рентгеновского диапазона спектра. Явление фотолюминесценции наблюдается в ряде газов, жидкостей и твердых тел, носящих общее название люминофоров. Для характеристики фотолюминесценции пользуются понятиями спектра возбуждения и спектра люминесценции. При этом под спектром возбуждения понимают совокупность лучистых потоков, при помощи которых производится возбуждение люминофора, а под спектром люминесценции — совокупность лучистых потоков, излучаемых люминофором.

По основному закону фотолюминесценции (закон Стокса—Ломмеля) спектр излучения люминофоров в целом и его максимум всегда сдвинуты по сравнению со спектром возбуждения и его максимумом в сторону длинных волн. Из этого следует, что видимое излучение может быть получено лишь в результате поглощения веществом наиболее коротковолнового или ультрафиолетового излучения. Инфракрасное излучение не способно вызвать люминесценцию в видимой области.

Вторым законом фотолюминесценции, определяющим соотношения между энергией поглощаемого излучения и энергией излучаемой, является закон квантового выхода, согласно которому каждый квант поглощенного излучения может вызвать не более одного кванта испускаемого излучения.

Катодолюминесценция возникает при бомбардировке люминофора электронным пучком. Особенности катодолюминесценции связаны со способом подвода к люминофору возбуждающей энергии и возникающими при ее поглощении вторичными электрическими явлениями. Если при фотолюминесценции один поглощенный квант энергии в лучшем случае дает один квант излучения люминесценции, то при катодолюминесценции один электрон, вошедший в слой люминофора, мо-

жет создать ряд вторичных электронов, часть которых способна возбуждать атомы люминофора. Катодолюминесценция характеризуется яркостью и световой отдачей.

Электролюминесценция возбуждается электрическим полем или током. Явление электролюминесценции имеет место в газах (при электрическом разряде) и в твердых телах. Его начальным этапом, в результате которого создается возбужденное состояние, всегда является прохождение тока, т. е. какая-либо форма электрического разряда. Конечный этап, во время которого происходит высвечивание, напоминает фотолюминесценцию.

При электрическом разряде возникновение электролюминесценции связано с возбуждением газа за счет элементарных процессов, протекающих в нем: возбуждение атома электронами, переход возбужденных атомов на более высокие энергетические уровни, переход метастабильных состояний в неметастабильные и обратно при соударениях возбужденных атомов с нейтральными частицами газа и т. д.

В твердых телах характер процесса электролюминесценции зависит от того, выходят ли свободные заряды из электродов или возникают в толще вещества, а также от распределения электрического поля внутри образца.

Наиболее типичны два случая электролюминесценции твердых тел. Первый имеет место, когда электрическое поле распределено более или менее равномерно по всему образцу, а свободные заряды проникают из электродов или генерируются в области p - n -перехода полупроводника. Излучение света в полупроводнике происходит при рекомбинации свободных электронов и дырок, а также при рекомбинации свободных носителей с посторонними включениями или дефектами структуры решетчатого вещества. Второй — когда электрическое поле концентрируется в небольшой области кристалла, например, на его краю или на p - n -переходе. В этом случае излучение света осуществляется локально, в отдельных участках кристалла или из отдельных участков p - n -перехода полупроводника.

Хемилюминесценция представляет собой род излучения, возбуждение которого непосредственно связано с энергией, выделяющейся в результате тех или иных

элементарных химических процессов. В результате химической реакции богатые энергией продукты реакции или сами отдают ее избыток в виде излучения, или возбуждают сталкивающиеся с ними молекулы. Испускание энергии происходит при этом в виде отдельных, единичных квантов, и наблюдаемый спектр излучения обладает вполне определенными, характерными для данной реакции, длинами волн. Энергетическая яркость излучения не описывается законами теплового излучения, в некоторых областях спектра оно более интенсивно, чем излучение черного тела при той же температуре, т. е. хемилюминесценция представляет собой неравновесный процесс.

Однако при высоких температурах не всякое излучение, сопровождающее химические реакции, может быть хемилюминесценцией. Если реакция протекает с выделением тепла, то освобождающаяся энергия может распределиться более или менее равномерно по объему реагирующей смеси. Это приведет к повышению температуры и чисто термическому свечению зоны реакции, тождественному со свечением нагретых тел, подчиняющемуся законам теплового излучения.

Критериями, позволяющими выделить хемилюминесценцию от теплового излучения, являются: превышение абсолютной интенсивности излучения над интенсивностью теплового излучения и непланетное распределение интенсивности в спектре свечения. Частными случаями хемилюминесценции являются биолюминесценция и кандолюминесценция. Биолюминесценция представляет собой результат биологических процессов. При кандолюминесценции свечение возникает при помещении некоторых веществ в пламя.

ЛАЗЕРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Кроме описанных, существует еще один вид излучения — лазерное, происхождение которого связано с оптическими свойствами инверсной среды. Частицы любой среды (атомы, молекулы или ионы) могут находиться в различных состояниях, отличающихся структурой электронного облака или характером относительного движения ионов в молекуле. Возможные стационарные состояния частиц определяют оптические свойства среды.

Одной из характеристик состояния является внутренняя энергия частицы. Эта энергия складывается главным образом из кинетической и потенциальной энергии электронов в электронном облаке атома или иона. В молекуле к этому добавляется кинетическая и потенциальная энергия относительного движения и расположения ионов, составляющих молекулу. Стационарным состоянием частицы соответствует дискретный ряд значений энергии. Состояние с наименьшей энергией наиболее устойчиво, оно называется основным. Все другие состояния, которым соответствует большая внутренняя энергия частицы, называются возбужденными. Превышение энергии возбужденного над энергией основного состояния представляет собой энергетический уровень данного состояния.

Частицы среды не пребывают в возбужденном состоянии бесконечно долго, а обычно переходят из одного в другое. При этом спектр излучения или поглощения вещества, излучаемый или поглощаемый его атомами, является дискретным.

Дискретность энергетического спектра свойственна не только атомам. Она присуща вообще любой системе взаимодействующих друг с другом частиц — молекуле, иону, твердому телу. Более сложное по сравнению с атомом строение молекулы проявляется в том, что она имеет гораздо большее число уровней энергии, чем атом. Часть энергетических уровней обусловлена движением электронов. Разности энергий между этими уровнями, как и в атоме, велики, они соответствуют видимому и ультрафиолетовому свету и рентгеновскому излучению. Другие энергетические уровни молекулы обусловлены колебаниями составляющих их атомов около положений равновесия. Разности энергий между этими уровнями меньше, они соответствуют инфракрасному излучению. Кроме того, часть энергетических уровней молекулы обусловлена колебаниями и вращением молекулы как целого. Разности энергий между вращательными уровнями еще меньше, они соответствуют радиоволнам. В твердом теле электронный и колебательный спектры гораздо богаче, чем у изолированных атомов или молекул. Это связано с тем, что в кристаллической решетке объединено огромное число атомов и молекул, взаимно влияющих друг на друга.

Число частиц, из которых состоит вещество, одно-

временно находящихся в каком-либо состоянии в единице объема среды, называется населенностью рассматриваемого состояния. Совокупность населенностей различных возможных состояний представляют собой распределение населенностей по состояниям. Если на среду не действуют какие-либо внешние факторы (температурные поля, облучение, электрический ток и т. д.), все частицы находятся в основном состоянии, среда остается невозбужденной. Среда, в которой некоторое количество частиц находится в возбужденном состоянии, называется возбужденной.

В общем случае можно представить, что несколько различных возбужденных состояний характеризуется одним и тем же значением внутренней энергии частицы, тогда данный энергетический уровень соответствует нескольким ее состояниям (вырожденное возбужденное состояние). Число различных состояний, соответствующих данному энергетическому уровню, называется степенью вырождения или статистическим весом уровня.

Поскольку внутренняя энергия атомов и молекул может принимать лишь дискретный ряд значений, то энергия электромагнитного поля в веществе также изменяется скачками, квантами. Рассмотрим, каким образом происходит обмен энергией между веществом и электромагнитным излучением. Существуют три типа оптических переходов: спонтанные, поглощающие и вынужденные. Если частица, находящаяся в возбужденном состоянии, переходит на более низкий энергетический уровень без каких-либо внешних воздействий, происходит так называемый спонтанный переход. Переход такого рода — случайный вероятностный процесс, совершаемый частицей в момент времени, принципиально непредсказуемый. Спонтанным переходам соответствует спонтанное излучение.

Случайность спонтанных переходов приводит к тому, что различные атомы и молекулы излучают неодновременно и независимо, поэтому фазы электромагнитных волн, излучаемых веществом, не согласованы друг с другом. Случайный характер имеет не только момент испускания кванта энергии, но и направление его распространения и его поляризация (направление электрического поля в электромагнитной волне). Таким образом, спонтанное излучение вещества немонахроматично, ненаправленно и неполяризовано, т. е. некогерентно.

Такой тип оптического перехода характерен для теплового и люминесцентного излучения.

Другим оптическим переходом является поглощение, при котором частица, поглотившая квант внешнего электромагнитного излучения, переходит в состояние с более высокой энергией. Поглощение отличается от спонтанного перехода не только направлением перехода, но и зависимостью от внешних условий. Если на атом, находящийся на нижнем энергетическом уровне, падают кванты электромагнитного излучения с частотами, близкими к частоте перехода атома с нижнего энергетического уровня на верхний, то может произойти переход атома на верхний энергетический уровень с поглощением одного кванта. Чем больше плотность квантов внешнего излучения, тем чаще происходят в веществе акты поглощения. Поэтому скорость процесса определяется не только населенностью исходного (нижнего) уровня, но и объемной спектральной плотностью энергий внешнего излучения на частоте перехода.

При взаимодействии электромагнитной волны с веществом возможен переход частиц с верхнего энергетического уровня на нижний, сопровождающийся излучением дополнительного кванта энергии. Это излучение под действием электромагнитного поля носит название вынужденного (индуцированного) излучения. Вероятность вынужденного перехода пропорциональна интенсивности излучения, вызывающего переход. При вынужденном излучении частица вещества отдает энергию электромагнитной волне, интенсивность которой вследствие этого увеличивается.

Отличительной особенностью вынужденного процесса является то, что квант, возникающий в результате перехода, и квант, стимулировавший переход, совершенно неотличимы друг от друга. Они имеют одну и ту же частоту, фазу, направление распространения и поляризацию. Поэтому вынужденное излучение, соответствующее стимулированным переходам, приобретает свойство монохроматичности, когерентности, направленности и поляризованности. Тожественность квантов приводит к тому, что при взаимодействии каждого из них с новым возбужденным атомом получается уже четыре кванта, вместо двух, затем 8, 16 и т. д. Именно эта особенность вынужденного излучения позволяет использовать его для усиления электромагнитных волн и

для создания генераторов монохроматического и когерентного излучения.

Для того чтобы среда (система частиц) усиливала излучение, число квантов поля, излучаемых ею в результате индуцированных переходов, должно превышать число поглощенных квантов. Однако в естественных условиях в веществе уровни с меньшей энергией населены плотнее, чем уровни с большей энергией. Это имеет место в случае, когда возбуждение вещества достигается под действием температуры окружающей среды.

Такое распределение населенностей характерно для теплового равновесного излучения. Поэтому при прохождении через среду электромагнитной волны одновременно с ее усилением за счет вынужденных переходов «вниз» происходит подавляющее его поглощение за счет переходов «вверх». В итоге в естественных условиях энергия волны будет не увеличиваться, а уменьшаться. Таким образом, чтобы волна, проходящая через вещество, не только не ослаблялась, а, наоборот, усиливалась, необходимо искусственно изменить в нем населенности уровней, а именно — увеличить населенность верхнего энергетического уровня атомов и уменьшить населенность нижнего, создать так называемую инверсию (обращение) населенностей.

Вещество, в котором хотя бы для одной пары состояний осуществлена инверсия населенностей, называется активным. В таком веществе при прохождении через него электромагнитной волны будет происходить ее усиление, так как в активном веществе преобладают вынужденные переходы.

Для того чтобы вещество усиливало распространяющуюся в нем электромагнитную волну частоты ν , частицы вещества должны находиться на двух энергетических уровнях: E_n и E_m . Кроме того, число частиц, находящихся в состоянии с большей энергией E_m , должно превышать число частиц, находящихся в состоянии с меньшей энергией E_n , т. е. должна существовать инверсия населенностей. Эти условия необходимы, но недостаточны для генерации. В реальных веществах всегда есть возможное дополнительное ослабление волны, не связанное с переходами между рабочими уровнями E_m и E_n . К ослаблению волны приводит, например, ненаправленное ее рассеяние на неоднородностях кристал-

лов. Кроме того, в веществе могут быть и другие пары уровней энергии, удовлетворяющие первому условию осуществления усиления в веществе, но не обладающие инверсией населенностей.

Итак, при прохождении электромагнитной волны через активное вещество происходит ее усиление, при этом скорость увеличения электромагнитной энергии пропорциональна самой энергии. Такая закономерность приводит к экспоненциальному росту интенсивности I электромагнитной волны с расстоянием l , пройденным волной в активном веществе: $I = I_0 \exp(\alpha l)$. Величина α называется коэффициентом квантового усиления активной среды и служит количественной характеристикой свойств активного вещества.

Однако при прохождении электромагнитной волны через активное вещество одновременно с ее усилением изменяются свойства и самой пары инвертированных уровней. Действительно, если в первоначальный момент времени вещество инвертировано, то переходы, возникающие при прохождении волны, будут приводить к уменьшению инверсии и, следовательно, коэффициент квантового усиления будет уменьшаться, причем при стремлении интенсивности волны к бесконечности $\alpha \rightarrow 0$. Этот процесс называется насыщением усиления. Как отмечалось ранее, при распространении волны в активном веществе часть интенсивности волны может теряться за счет всякого рода потерь. Изменение интенсивности волны при ее распространении в веществе только за счет потерь описывается уравнением: $I = I_0 \exp(\beta l)$, где β характеризует потери в веществе, не связанные с инвертированным переходом. Коэффициент β служит количественной характеристикой потерь в активном веществе.

В результате суммарная интенсивность волны с учетом ее ослабления изменяется с расстоянием по закону: $I = I_0 \exp[(\alpha - \beta)l]$. Отсюда вытекает третье условие квантового усиления: интенсивность электромагнитной волны в активном веществе нарастает, если коэффициент квантового усиления не только больше нуля, но больше коэффициента потерь активного вещества. Это есть условие, при котором активное вещество является усилителем для проходящего через него электромагнитного излучения.

Свойство инверсной среды усиливать проходящее

через нее электромагнитное излучение на частоте инвертированного перехода используется в оптических квантовых генераторах — лазерах. Так как усиление создается за счет вынужденного излучения, то усиленное излучение обладает всеми свойствами вынужденного: монохроматичностью, когерентностью, направленностью, интенсивностью и поляризованностью. Разумеется, наряду с вынужденным излучением инверсная среда испускает и спонтанное излучение за счет переходов частиц как между инвертированными, так и между неинвертированными состояниями.

Вещество, в котором может быть получено инверсное распределение населенностей частиц, является активной средой оптического квантового генератора (лазера), а конструктивный элемент, содержащий его, — активным элементом лазера. Процесс, с помощью которого достигается инверсия в активном рабочем веществе, называется накачкой, а физическая система, обеспечивающая этот процесс, — системой накачки.

Для превращения процесса усиления в процесс генерации, т. е. для реализации оптического квантового генератора, необходима еще одна система — система положительной обратной связи. Принцип положительной обратной связи заключается в том, что часть усиленного сигнала возвращается обратно на вход усилителя, где она снова усиливается, и т. д. Если усиление, достигаемое с помощью обратной связи, превзойдет суммарные потери усилителя и цепи обратной связи, то усилитель самовозбудится и начнет генерировать колебания независимо от наличия входного сигнала. Таким образом, положительная обратная связь позволяет не только значительно повысить усиление, но может превратить усилитель в генератор.

В квантовых генераторах излучения роль обратной связи обычно выполняет оптический резонатор — две отражающие поверхности (зеркала), между которыми располагается активный элемент. Наличие резонатора приводит к тому, что свет, пройдя через активное вещество, усиливается, затем, отразившись от зеркала, снова проходит через вещество и снова усиливается и т. д. Если зеркала не поглощают свет, а полностью его отражают, то в результате многократного пробега волны через активное вещество усиление может достигнуть больших значений. Поэтому если даже на такой

усилитель не подается извне никаких сигналов, его собственное случайное излучение (неизбежное из-за спонтанных переходов) усилится за счет вынужденных переходов, в результате чего усилитель превратится в генератор света.

Однако мощность излучения не может при этом возрастать неограниченно. Каждый вынужденный переход «вниз» — с верхнего энергетического уровня на нижний — уменьшает число активных атомов. Перейдя вниз, атомы начинают поглощать излучение, и если не восстанавливать непрерывно каким-либо способом избыток атомов на верхнем уровне, наступает выравнивание населенностей уровней (равенство поглощения и вынужденного испускания) и усиление исчезает. Кроме того, в оптическом резонаторе могут распространяться лишь те колебания, частоты которых удовлетворяют условию образования стоячих волн, т. е. условию резонанса. Существуют определенные дополнительные потери, которые вносит устройство обратной связи.

Одним из основных условий возникновения генерации в активном веществе является создание такой инверсии, чтобы усиление активного элемента превосходило суммарные потери энергии.

В естественных условиях при тепловом равновесии между веществом и окружающей средой нижние энергетические уровни населены более плотно, чем верхние. Поэтому обычное вещество не усиливает, а лишь поглощает энергию проходящей через нее электромагнитной волны. Основная задача, возникающая при создании квантовых усилителей и генераторов, состоит именно в нахождении способов нарушения теплового равновесия рабочего вещества таким образом, чтобы обеспечить избыточную населенность верхнего уровня перехода по сравнению с нижним.

Трудности осуществления инверсии населенностей в различных веществах в значительной степени связаны с тем, что попытки нарушить тепловое равновесие вызывают квантовые переходы, которые вновь возвращают систему в исходное равновесное состояние. Это явление называется релаксацией.

Инверсия населенностей может быть создана рядом методов. Одним из первых появился метод, в котором рабочее вещество представляет собой поток не

взаимодействующих друг с другом атомов или молекул (атомные и молекулярные пучки). Этот метод состоит в пространственном разделении атомов или молекул пучка, находящихся на различных энергетических уровнях, с помощью постоянного во времени, но неоднородного в пространстве электрического или магнитного поля, которое удаляет из пучка частицы, имеющие энергию, соответствующую нижнему энергетическому уровню. Оставшиеся в пучке частицы попадают в резонатор и возбуждают в нем электромагнитные колебания за счет вынужденных переходов вниз.

Стремление получать большие мощности вынужденного излучения привело к разработке других методов создания инверсии населенностей. Одним из методов, применяемых в этом случае, называемый методом накачки, состоит в нарушении теплового равновесия с помощью достаточно мощного вспомогательного излучения (накачки), имеющего частоту, совпадающую с частотой излучения рабочего тела.

В веществе, имеющем два энергетических уровня, это вспомогательное излучение создает перераспределение частиц по энергетическим уровням и насыщение перехода. Поэтому такое вещество не может генерировать излучение. В веществе же, имеющем три и более энергетических уровней, можно создать инверсию населенностей с помощью накачки. В этом случае если накачка производится на частоте перехода между нижним и верхним энергетическими уровнями, со временем наступает насыщение перехода между этими уровнями. Однако при этом населенность промежуточного уровня, увеличиваясь за счет релаксационных процессов перехода с верхнего уровня на промежуточный, может превысить населенность нижнего уровня. Переход с промежуточного уровня на нижний окажется инвертированным, и на его частоте будет происходить усиление и генерирование излучения.

Возможен также случай, когда релаксация сильнее влияет на процесс перехода с промежуточного на верхний уровень, и тогда частицы будут накапливаться не на промежуточном энергетическом уровне, а на нижнем и верхнем. При этом верхний уровень может оказаться более населенным, чем промежуточный. В этом случае будут усиливаться или генерироваться волны с частотой

тами, соответствующими частоте перехода с верхнего на промежуточный энергетический уровень. Особенностью данного метода является то, что частота накачки должна быть больше частоты усиливаемого сигнала.

Инверсия населенностей, в частности, в газах, может быть создана с помощью накачки электрическим разрядом. Электрический разряд в газе может не только ионизировать, но и возбуждать атомы, сталкивающиеся с электронами. При определенных условиях этот процесс может привести к возникновению инверсии населенностей, необходимой для возникновения квантовой генерации.

Существуют и другие способы создания инверсии. При химическом способе инверсия населенностей в рабочем веществе и генерация света возникают при химической реакции, в результате которой образуются возбужденные атомы, молекулы или химические радикалы. При газодинамическом способе источником энергии служат колебательно-возбужденные молекулы, содержащиеся в газе, нагретом до высокой температуры. Усиливающая среда образуется за счет процессов тепловой релаксации молекул во время течения газа через сверхзвуковое сопло.

До сих пор говорилось об энергетических уровнях, их населенностях и методах инверсии населенностей в системах с относительно малой концентрацией частиц. В твердых телах, где рабочими частицами являются не примесные ионы, а основные ионы, атомы или молекулы, образующие кристаллическую структуру этого тела, частицы расположены столь близко друг к другу, что такое вещество уже нельзя рассматривать как систему слабо взаимодействующих частиц. В этом случае весь кристалл представляет собой единую квантовую систему, поэтому в нем возможны переходы электронов от одного атома к другому. Обмен электронами приводит к тому, что уровни энергии электронов расширяются, сливаясь в энергетические зоны, ширина которых сравнима с расстоянием между ними.

В полупроводниках подавляющее большинство внешних, валентных электронов находится в валентной зоне, а ближайшая к ней сверху зона проводимости практически пуста. Возбуждаясь под действием электромагнитного излучения, электроны могут переходить в зону

проводимости из валентной зоны, образуя в ней дырки. Спустя некоторое время электрон проводимости возвращается в валентную зону, заполняя дырку. Такой процесс называется рекомбинацией электрона и дырки.

Рекомбинация, сопровождающаяся излучением, может быть не только спонтанной, но и вынужденной. В естественных условиях при тепловом равновесии зона проводимости практически пуста, а в валентной зоне нет дырок. Вынужденное излучение будет преобладать над поглощением только при таком распределении населенностей, когда электроны проводимости плотно заполняют область вблизи «дна» зоны проводимости, а дырки — вблизи «потолка» валентной зоны. В этих условиях в полупроводниках возможно усиление или генерация электромагнитного излучения.

Создание в полупроводнике необходимого неравновесного распределения по энергиям электронов и дырок осуществляется методом инжекции извне электронов и дырок в полупроводник, оптической накачкой или бомбардировкой полупроводника пучком электронов.

Таким образом, если система накачки независимо от способа ее осуществления обеспечивает стационарную инверсию населенностей в рабочем веществе, то электромагнитная энергия усиливается непрерывно и выходное излучение представляет собой непрерывную электромагнитную волну. Если же накачка происходит импульсами, то и излучение оказывается импульсным.

Так же как тепловое излучение и люминесценция, лазерное излучение оценивается энергетическими параметрами, из них наиболее важными являются мощность и энергия излучения. При импульсном излучении, если распределение мощности в импульсе неравномерно, вводятся понятия средней и максимальной мощности импульса. Лазеры отличаются от других источников излучения рядом особенностей. В них отсутствуют реальные излучающие поверхности. Структура лазерного пучка определяется дифракционным характером расходимости излучения. Для оценки характеристик излучения лазеров, однако, можно использовать известные фотометрические величины, применяемые для теплового излучения. Такими характеристиками являются: энергия излучения Q_l , поток излучения Φ_l , энергетическая сила света I_l , энергетическая светимость M_l , энергетическая освещенность E и энергетическая яркость L_l .

Источники излучения

ИСТОЧНИКИ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Энергия теплового излучения любого тела и спектр определяются исключительно его тепловым состоянием, т. е. его температурой. Тепловое излучение оптического диапазона генерируется при нагреве твердых тел электрическим или иным способами или в результате сжигания какого-либо горючего вещества. Наиболее широкое применение нашли излучатели, нагрев которых осуществляется при прохождении через них электрического тока.

Такого типа источники теплового излучения применяются в качестве образцовых излучателей, работающих в определенном диапазоне температур, в постоянных температурных точках, как источники с эталонным распределением энергии по спектру и в качестве источников освещения. К ним относятся различные модели черных тел, электрические лампы со стержневидным открытым телом накала и электрические лампы накаливания.

Из всех температурных излучателей при одной и той же температуре наибольшую энергетическую светимость имеет черное тело. Спектральное распределение его излучения описывается функцией Планка. Эффективный коэффициент излучения отверстия технического черного тела меньше единицы, и он зависит от трех основных факторов; формы полости и размера отверстия, материала внутренних стенок полости, неравномерности температуры внутренних стенок полости.

Модели черных тел, как правило, имеют геометрические формы, например сферическую, конусовидную, цилиндрическую либо комбинированную из этих форм. В качестве черного тела с большой площадью отверстия, а также малой длиной полости употребляется конусная или клинообразная полость.

Наиболее часто применяемой формой модели черного тела является цилиндрическая полость с диаметром отверстия тем же самым или меньшим, чем диаметр полости. Часто в качестве технического черного тела используется полый цилиндр с боковым отверстием в виде круга или продольной щели. Боковое отверстие в таком цилиндре может рассматриваться как черная поверх-

ность в том случае, когда размер участка стенки с равномерной температурой, в котором вырезано отверстие, не менее чем в 10 раз больше внутреннего диаметра полости. Коэффициент излучения круглого отверстия в боковой поверхности цилиндрической полости зависит от отношения диаметров полости и отверстия и от коэффициента излучения материала стенок полости.

В конкретных технических моделях черных тел неравномерность температуры стенок вызывает отклонение энергетической температуры от истинной температуры черного тела. Это приводит к погрешностям определения энергетической светимости и энергетической яркости, если в качестве истинной температуры черного тела принимается температура тыльной стенки полости. Черное тело с цилиндрической полостью при градиенте температур вдоль стенок, не превышающем 3 градусов на сантиметр, является идеально черным телом, поскольку она воспроизводит излучение идеально черного тела с точностью до 0,1%.

Основным критерием при классификации технических черных тел является диапазон рабочих температур.

Технические черные тела для работы при температурах до 200°С представляют собой обычно металлическую полую сферу, изготовленную из материалов с большой теплопроводностью, как правило, из меди. Внутренняя стенка полости покрывается платиновой чернью или сажей. Для обеспечения в полости постоянной температуры служит термостат.

Для работы при температурах порядка нескольких сотен градусов Цельсия используются технические черные тела, имеющие конусную полость, выполненную чаще всего из стали или из меди. Для обеспечения высокой интегральной излучательной способности материала полости поверхность металла окисляется или чернится. Часто технические черные тела снабжаются комплексом разных диафрагм, поскольку эффективный интегральный коэффициент поглощения технического черного тела, а значит, и эффективный коэффициент излучения отверстия растут с увеличением числа отражений излучения, попавшего в полость.

Для работы в диапазоне температур от нескольких сотен до 2000°С служат обычно черные тела в виде цилиндрических труб, изготовленных из стали или керамических материалов. Металлические полости испол-

зуются обычно для диапазона температур 600—1100°С, а для более высоких температур применяются полости из окислов Al или Th, С. Внутренняя поверхность стальных труб для повышения полной излучательной способности материала часто покрывается смесью окислов Cr, Ni и Co.

Создание технических черных тел для работы при температурах выше 2000°С встречает серьезные трудности из-за интенсивного окисления материала, из которого изготавливаются полости. Поэтому употребляемые для этой цели С и W используются в черных телах, работающих в вакууме или в защитной атмосфере, обычно аргоновой. Такие технические черные тела чаще всего изготавливаются в виде графитовых труб, нагреваемых непосредственно термосопротивлениями. При температуре около 2500°С нагревание таких труб осуществляется преимущественно индукционным способом. В настоящее время построены технические черные тела с графитовыми полостями, предназначенные для работы при температуре 3200°С.

Наиболее равномерного распределения температур стенок полости можно достигнуть в технических черных телах, используемых при работе в постоянных температурных точках — температурах плавления (затвердевания) разных веществ, преимущественно металлов. Тщательно изготовленные технические черные тела при этих температурах работают с более высокой точностью, чем модели, работающие в широком диапазоне температур. В настоящее время такие точные модели созданы для температур плавления Au (1063°С), Pd (1552°С), Pt (1769°С) и Ir (2443°С).

Рассмотренные модели черных тел находят широкое применение. Они служат эталонами для калибровки пирометров, термоэлементов и радиометров, образцами сравнения для определения излучательной способности материалов и параметров излучения лабораторных и промышленных излучателей и источников света, а также для определения интегральной чувствительности приемников энергии излучения. Кроме того, технические черные тела используются как образцовые источники излучения в спектрофотометрической аппаратуре, а также для определения характеристик и параметров различных стандартных материалов, приборов и элементов, применяемых в оптике и инфракрасной технике.

Другой вид источников теплового излучения, нашедший широкое применение в практике, — электрические тепловые излучатели с открытыми телами накала. В зависимости от того, из какого материала сделано тело накала, эти источники могут работать в атмосфере окружающего воздуха, в вакууме или в инертной среде. Тело накала чаще всего имеет форму стержня с различными сечениями, трубы, толстого прямого провода или плиты специальной формы. Тела накала изготавливаются из неметаллических материалов или чистых металлов. Неметаллические тела накала имеют большие значения интегрального коэффициента излучения и могут работать в атмосфере воздуха (за исключением графита). Металлические тела накала имеют меньший интегральный коэффициент излучения, но могут использоваться при более высоких температурах при условии, что они будут работать в вакууме или в инертной среде.

Примерами тепловых излучателей с открытым неметаллическим телом накала являются штифт Нернста и силитовый излучатель. Штифт Нернста представляет собой стержень, изготовленный из смеси тугоплавких окислов — двуокиси циркония и окиси иттрия. Основным компонентом этой смеси является двуокись циркония, содержание которой в смеси составляет 85—95%. К концам стержня присоединены платиновые электроды для подвода электрического напряжения. Наибольшая допустимая рабочая температура от 1800 до 2000 К, нормальная рабочая температура около 1700 К. Штифт Нернста работает в воздушной среде. Его недостатки: низкая механическая прочность, значительная хрупкость и возникающее иногда коробление стержня. Достоинством штифта являются стабильность его работы, большой поток излучения и отсутствие продуктов сгорания.

Наиболее распространенными среди излучателей с неметаллическими телами накала являются карборундовые (силитовые) излучатели. Карборундовые излучатели так же, как и штифт Нернста, имеют форму стержня, но изготавливаются из однородной и твердой массы. Эта масса состоит из 95% (и более) карбида кремния и отличается значительной хрупкостью и ломкостью. Рабочая температура карборундового стержня составляет 1200—1400 К; при температуре выше 1400 К уже начинается разложение карбида кремния.

Защищая стержень слоем окиси тория, можно поднять рабочую температуру до 2200 К. Излучение карборундового стержня весьма близко к излучению серого тела. В диапазоне 1,5—15 мкм спектральный коэффициент излучения карборундовых стержней имеет значения в пределах 0,7—0,9. Основные достоинства карборундовых элементов составляют их хорошие излучательные свойства, достаточно высокая рабочая температура и возможность работы в свободном воздухе.

Относительно недавно был создан еще один тип тепловых излучателей с открытым неметаллическим телом накала, кремниймолибденовые, основными компонентами материала которых являются Mo и Si. Эти излучатели могут работать при температурах до 1700°С, причем в отличие от карборундовых не обнаруживают признаков старения. Недостатком их является то, что при температурах свыше 1300°С они становятся пластичными и изменяют форму под действием собственного веса. Излучение кремниймолибденовых материалов очень близко к излучению карбида кремния. Интегральный коэффициент излучения мало зависит от температуры и составляет для окисленной поверхности около 0,8.

Источники оптического излучения с открытым металлическим телом накала делаются из Pt, Mo, Ta или W и применяются как источники с высокими температурами. Металлические тела накала при высоких температурах могут работать только в защитной атмосфере или вакууме. Наибольшее распространение получили излучатели с телом накала из Mo и W. Молибденовые излучатели применяются до температуры 1650°С и используются только в вакууме или в защитной среде. Вольфрамовые тела накала могут работать при температурах до 2700°С в условиях вакуума или до 3000°С в атмосфере инертного газа.

В спектрофотометрии в качестве источника теплового излучения нашло широкое применение излучение кратера угольной дуги. Температура анодного кратера дуги имеет вполне однозначную величину, близкую к температуре возгонки углерода при атмосферном давлении (около 4000 К). В области длин волн 0,25—1,5 мкм излучение анодного кратера дуги может служить стандартом спектрального распределения яркости с точностью порядка 2—3%. Среди источников тепло-

вого излучения, в которых излучателем служит накаливаемое твердое тело, анодный кратер угольной дуги обладает наивысшей температурой.

В качестве источников теплового излучения используются также лампы накаливания. Среди них наиболее широкое применение находят лампы общего назначения, рефлекторные, специального назначения и галогенные. Лампы накаливания общего назначения используются для светотехнических целей. Это лампы накаливания с шарообразными колбами, с нормализованным набором мощностей и напряжений. Большинство ламп накаливания общего назначения — односпиральные с прозрачной колбой. Рефлекторные лампы накаливания отличаются от обычных ламп главным образом формой тела накала, а также формой и размерами стеклянной колбы. Это отличие вызвано стремлением к получению сосредоточенного потока излучения.

Группа ламп специального назначения объединяет транспортные, лампы оптических систем, светоизмерительные, а также специальные лампы накаливания. Тела накала транспортных ламп выполняются из формоустойчивого вольфрама, кроме того, они нагреваются до небольших температур. Лампы оптических систем имеют повышенные значения яркости. Кроме того, положение тела накала по отношению к соответствующей оптической системе должно быть строго фиксированным и неизменным в процессе работы системы. К лампам оптических систем относят кинопроекторные, прожекторные и лампы-фары.

Светоизмерительные лампы по своей конструкции значительно отличаются от ламп накаливания общего назначения, поскольку предназначены для воспроизведения световых единиц и световых измерений. Среди них наибольший интерес представляют лампы, служащие эталонами яркостной температуры. Их можно разделить на две группы: термометрические лампы и лабораторные. Характерной чертой термометрических ламп является ленточное тело накала. Тело накала изготовляется из вольфрама или тантала. Диапазон температур тела накала бывает различным и преимущественно находится в пределах 800—2900 К. Телами накала лабораторных ламп служат вольфрамовые спирали, вольфрамовые и молибденовые проволоки, спирали и ленты, покрытые тугоплавкими окислами. Для повышения ин-

тегрального коэффициента излучения телам накала в лабораторных лампах придается форма в виде разного рода полостей. Эти лампы чаще всего используются в качестве образцовых излучателей.

К специальным лампам накаливания относятся низковольтные лампы, миниатюрные и сверхминиатюрные — очень небольшие по размерам источники излучения, предназначенные для специальных режимов и условий работы.

Широко применяются галогенные лампы накаливания благодаря высокой световой отдаче и большому сроку службы, весьма малым габаритам, высокой яркости и постоянству световых характеристик в процессе работы. Колбы галогенных ламп заполняются смесью аргона и йода. Благодаря находящемуся в лампе йоду в ней возникает так называемый вольфрамово-йодный цикл. Он выглядит следующим образом: при температуре в диапазоне $300\text{--}1200^\circ\text{C}$ пары йода соединяются на стенке колбы с испарившимися частицами вольфрама, образуя йодистый вольфрам. Это соединение при температурах выше 250°C находится в парообразном состоянии. Диффундируя в колбе лампы и попадая в зону вблизи тела накала с температурой выше $1400\text{--}1600^\circ\text{C}$, молекулы йодистого вольфрама распадаются. Частицы вольфрама остаются вблизи тела накала и других деталей с температурой выше 1600°C и оседают на них. Освободившиеся атомы йода, диффундируя в зоны с более низкой температурой, на стенках колбы вновь соединяются с частицами вольфрама и т. д. Таким образом, при определенных условиях образуется возвратный цикл, в результате которого испарившиеся частицы вольфрама со стенок колбы переносятся на тело накала и в прилегающую к нему зону.

Для того чтобы этот процесс осуществлялся длительное время, необходимо, чтобы температура внутренней стенки колбы повсюду была выше 250°C , так как иначе йодистый вольфрам будет конденсироваться. Кроме того, максимальная температура стенки колбы должна быть заметно ниже 1200°C , так как при этой и более высокой температуре начинается разложение йодистого вольфрама. Минимальная температура тела накала должна быть выше 1600°C , так как при этой температуре начинается разложение йодистого вольфрама.

Параметры некоторых ламп накаливания

Тип лампы	Напряжение, В	Мощность, Вт	Световой поток, лм	Примечание
Б220-100	220	100	1350	Лампа общего назначения
НЗК220-300	220	300	4600	Зеркальная направленного излучения
ОП-13-50	13	50	1500	Лампа с двойной нитью
ПЖ-28	12	250	6625	Прожекторная
СИ6-100	6	100	2840 К (цветовая температура)	Для калибровки ярких температур
СИП107-1500	107	—	1500	Для калибровки светового потока
НСМ6-90-1	6	0,5	1	Сверхминиатюрная
КГМ6-3-15	6,3	15	210	Галогенная лампа
КИМ220-1000-1	220	1000	26 000	То же

Лампам с йодно-вольфрамовым регенеративным циклом присущ ряд недостатков, прежде всего агрессивность йода, трудность введения в лампу необходимых его количеств. Поэтому подавляющее большинство галогенных ламп накаливания делается с добавками бромистого метила и бромистого метилена. Эти соединения при нормальных условиях представляют собой жидкости, и их пары химически не очень активны. Они удобны для введения в лампу как отдельно, так и в смеси с инертным газом. При работе ламп эти соединения в зависимости от температуры и давления распадаются сперва на ряд промежуточных продуктов, и только в зонах с температурой выше 1500°С образуется чистый Вг. В последнее время в галогенных лампах начинают применять новые химические соединения, которые позволяют использовать высокореактивные галогены, та-

кие, как Br и Cl. К их числу относятся, например, соединения фосфора и азота с галогенами. Сравнение галогенных ламп с обычными лампами накаливания показывает, что первые имеют более высокую цветовую температуру тела накала (3000—3400 К), в несколько раз меньший объем и в несколько раз больший срок службы.

Основные параметры некоторых ламп накаливания приведены в таблице.

ИСТОЧНИКИ ЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В качестве источников оптического излучения нашли широкое применение люминесцентные источники. Их можно объединить в две группы: газоразрядные, в которых тем или иным способом используется электролюминесценция газа, и твердотельные, основанные на электролюминесценции кристаллофосфоров.

В результате многочисленных поисков электрических источников излучения со световой отдачей, большей, чем у малоэкономичных ламп накаливания, был создан обширный класс газоразрядных источников излучения. Помимо высокого КПД, газоразрядные источники излучения обладают особенностями, обеспечивающими им широкое распространение в различных отраслях промышленности и народного хозяйства. Так, помимо освещения помещения и открытых пространств (люминесцентные лампы низкого и высокого давления, ксеноновые, натриевые), газоразрядные источники излучения используются для сигнального и рекламного освещения (газосветные лампы, неоновые, аргоновые и с люминофорами), для биологических и медицинских целей — как источники ультрафиолетового облучения и для ряда специальных целей (спектральные, импульсные и др.).

Газоразрядными лампами называют источники излучения, в которых род газа, его давление и электрический режим подобраны таким образом, чтобы получить определенные распределения энергии излучения по длинам волн. Современные газоразрядные источники имеют ряд существенных преимуществ перед лампами накаливания: высокие КПД, значительная световая отдача, получение излучения определенного спектрально-

го состава, значительная яркость, возможность модулирования потока излучения, безынерционность, позволяющая использовать их в импульсном режиме.

Большинство газоразрядных ламп делается в виде стеклянной или кварцевой колбы с впаянными в нее металлическими электродами различной конструкции. После удаления воздуха колбу заполняют до нужного давления газом (обычно инертным) и небольшим количеством металла с высокой упругостью паров (ртутью, натрием, кадмием и др.) и запаивают.

Если к электродам лампы приложить определенное напряжение, называемое напряжением зажигания, то в ней возникает электрический разряд, который вызывает свечение газа. Возникший в газе и парах металла электрический разряд является процессом переноса электрических зарядов под действием электрического поля. Этому процессу сопутствуют явления люминесценции и температурного излучения. В то время как спектр температурного излучения является сплошным, излучение газа под влиянием электрического разряда будет смешанным, полосатым или линейчатым в зависимости от природы газа.

Электролюминесцентные источники излучения в зависимости от вида газового разряда делят на источники с дуговым, импульсным и тлеющим разрядом. Для дугового разряда характерны: высокая плотность тока у катода от 10^{-2} до 10^4 А·см⁻²; небольшое катодное падение потенциала, составляющее около 10 В; стягивание разряда в шнур при повышении давления в разрядном промежутке; дуговой разряд протекает при различных давлениях наполняющего газа или паров металла от 10^{-3} мм рт. ст. до нескольких сотен атмосфер. Для тлеющего разряда характерны малая плотность тока у катода от 10^{-5} до 10^{-1} А·см⁻²; высокое катодное падение потенциала 50—400 В; малое давление газа или паров металла, заполняющих разрядный промежуток от сотых долей до нескольких десятков миллиметров ртутного столба.

Дуговые газоразрядные лампы по виду среды, в которой происходит разряд, можно разделить на лампы с инертными газами — это гелиевые, неоновые, аргоновые, криптоновые, ксеноновые и их смеси; лампы с парами металлов — цезия, ртути, натрия, кадмия, цинка,

Так как работа дуговых газоразрядных ламп существенно зависит от давления газов или паров металла в них во время работы, то выделяют три группы: лампы низкого (0,01—1,00 мм рт. ст.), высокого (0,3—3 кГс/см²) и сверхвысокого давления (свыше 3 кГс/см²).

В газосветных дуговых лампах сверхвысокого давления используются ксенон, аргон, криптон. Спектр излучения дуги в этих газах имеет равномерное сплошное распределение в оптическом диапазоне спектра. Излучение в видимой и в коротковолновой инфракрасной области спектра близко по спектральному распределению к излучению абсолютно черного тела при температуре 5200—5700 К. В инфракрасной части спектра наблюдаются отдельные резкие линии (максимумы излучения), которые перемещаются в длинноволновую область спектра по мере увеличения атомного веса газа (для ксенона $\lambda=0,84, 0,9, 1$ мкм; для аргона $\lambda=0,76, 0,80, 0,84$ мкм; для криптона $\lambda=0,76, 0,82, 0,90$ мкм). За последние годы широкое распространение получили ксеноновые лампы сверхвысокого давления. По своей экономичности ксеноновые лампы занимают среднее положение между лампами накаливания и ртутно-кварцевыми лампами высокого давления. Световая отдача ксеноновых ламп зависит от мощности и в среднем составляет от 20 до 50 лм/Вт.

Разновидностью газоразрядных ламп являются натриевые лампы. Излучение разряда в парах натрия зависит от их давления и может давать либо монохроматическое излучение, либо излучение различных длин волн. В связи с этим различают два основных типа ламп: натриевые лампы низкого и высокого давления. Они представляют собой U-образную трубку из боросиликатного стекла, устойчивого к воздействию паров натрия, наполненную соответствующим количеством натрия и инертными газами неоном и аргоном. При подаче на лампу соответствующего напряжения начинается разряд в неоне и лампа светится красным светом. Под влиянием разряда в неоне разрядная трубка нагревается и натрий плавится (температура плавления натрия 98°С). Часть расплавленного натрия испаряется, и по мере повышения давления паров натрия в разрядной трубке лампа светится желто-оранжевым светом. Для получения наибольшего КПД лампы тем-

пература разрядной трубки должна поддерживаться в пределах 270—280° С.

Использование ртути в газоразрядных лампах обусловлено несколькими причинами. Ртуть имеет небольшое число ярких спектральных линий в ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра. Упругость паров ртути достаточно высока, что позволяет сравнительно легко создавать лампы с широким диапазоном давлений. В зависимости от давления паров ртути, наполняющих колбу, ртутные лампы с дуговым разрядом делятся на лампы низкого, высокого и сверхвысокого давления. Распределение энергии излучения по спектру в ртутно-дуговых лампах зависит от давления паров ртути. При низком давлении и малых плотностях тока наибольшая часть излучения приходится на ультрафиолетовую и видимую область спектра; при высоком давлении паров ртути увеличивается излучение в инфракрасной области.

Ртутная лампа ПРК (прямая — ртутно-кварцевая) наполнена аргоном до давления в несколько миллиметров ртутного столба; количество жидкой ртути дозировано таким образом, чтобы при рабочей температуре вся ртуть испарилась и при этом создалось давление паров 1—1,2 ат. Во время работы кварцевая колба нагрета до 700—750 К. Температура разряда в лампе достигает 6000—6500 К. Излучение лампы ПРК содержит ряд резонансных самообращенных линий, а также ряд ультрафиолетовых и видимых линий. Важным в спектре являются ультрафиолетовые линии 313 и 366 нм, которые используются для возбуждения люминесценции, и линия 435,8 нм, используемая для возбуждения комбинационного рассеяния. В инфракрасной области спектра до $\lambda=2$ мкм спектр непрерывен; от 3 до 50—100 мкм, где кварц непрозрачен, излучение лампы определяется излучением нагретых стенок колбы. Ртутный разряд высокого давления в стабилизированных условиях служит эталонным источником с известным распределением энергии по спектру (лампа с ультрафиолетовой нормалью). Ртутные лампы низкого и высокого давления используются главным образом как источники излучения в видимой и ближней ультрафиолетовой ($\lambda=0,36—0,4$ мкм) области спектра.

Дуговые ртутные шаровые лампы (ДРШ), называемые также СВДШ — сверхвысокого давления — имеют

толстостенную кварцевую колбу. В колбу впаяны три электрода, два основных, расположенных на одной оси, и один вспомогательный, служащий для облегчения возникновения разряда между основными электродами. Лампа наполнена инертным газом и дозированным количеством ртути. Давление паров ртути в рабочем состоянии лампы достигает $3\text{--}5 \cdot 10^6$ н/м² (30—50 атм). В этих условиях дуговой разряд в парах ртути концентрируется между концами электродов, а яркость разрядного промежутка достигает больших величин. Температура в центральной части дугового разряда достигает 10 000 К. Эти источники могут быть использованы как излучатели коротковолнового инфракрасного излучения. Лампы этого типа являются практически точечными источниками излучения.

Ряд химических элементов, излучение которых представляет практический интерес, не может быть использован в источниках излучения из-за недостаточно высокой упругости пара при существующих температурах или из-за их разрушающего действия на раскаленную колбу и электроды. Исследования показали, что если в ртутный разряд ввести некоторые добавки в виде простейших химических соединений ряда элементов, в частности галоидные соединения щелочных и щелочноземельных металлов, в особенности их йодиды, то можно получить не только улучшение цветности ламп, но и значительно повысить их экономичность.

Попадая в канал разряда, молекулы введенного в лампу йодида металла в высокотемпературной зоне диссоциируют, т. е. распадаются на ионы йода и соответствующего металла. При этом излучается свет со спектром, характерным для данного элемента. Излучение добавок, смешиваясь с излучением ртутного разряда, меняет цветность излучения, даваемого лампой. Из высокотемпературной зоны атомы йода и металла диффундируют по направлению к стенкам трубки, имеющим более низкую температуру, где вновь воссоединяются в первоначальное соединение. Если в лампу вводится не один, а несколько разных элементов в виде простейших химических соединений, то для каждого элемента в лампе поддерживается свой замкнутый цикл, что позволяет вводить в лампу йодиды щелочных металлов, таких, как Та, Na, In, Cs и др., которые в чистом виде активно реагируют с кварцевым стеклом,

поэтому не могут быть использованы как излучающие добавки. В настоящее время созданы образцы ламп, в которых применена смесь йодидов Na, Ta и In, имеющих световую отдачу 80—100 лм/Вт. В таблице приведены параметры некоторых газоразрядных ламп.

Параметры некоторых газоразрядных ламп

Тип лампы	Марка	Мощность, Вт	Напряже- ние на лам- пе, В	Световой поток, лм	Яркость, кд/м ²
Ртутно-кварцевые высокого давления	ДРТ220	220	70	—	—
	ПРК8	220	70	—	—
Ртутно-кварцевые сверхвысокого давления	ДРШ-100-2	100	20—25	1200	—
	ДРШ-1000	1000	75—90	53 000	—
Шаровые ксеноновые	ДКсШ 200	200	70	—	90 · 10 ⁶
	ДКсШ 6000	6000	40	17 000	—
Трубчатые ксеноновые	ДКсТБ 2000	2000	60	37 000	—
	ДКсТБ 20000	20 000	220	550 000	—
Натриевая низкого давления	ДНа0110	140	—	70—80	—
Натриевая высокого давления	ДРЛ	400	—	90—130	—
Металлогаллоидные	ДРИ 700	700	120	53 000	—
	ДРИ 2000	2000	230	180 000	—

Электрическая дуга между твердыми электродами, нагреваемыми за счет энергии, выделяющейся в процессе дугового газового разряда, также может служить источником излучения. Катод, раскаляясь при включении дуги, испускает поток электронов, которые бомбардируют анод, накаляя его до белого свечения. Излучение дуги определяется главным образом температурой кратера, который излучает около 85% энергии, в то время как на излучение катода приходится 10%, а на излучение пламени — 5% от общей энергии излучения. Яркость дуг достигает 180—200 млн. нт. при питании постоянным током и около 12 млн. нт. — при питании переменным током.

Импульсные газоразрядные источники излучения предназначены для получения кратковременных вспышек высокой яркости длительностью 10^{-2} — 10^{-6} с. Они могут быть разделены на две группы, отличающиеся по

принципу конструкции: импульсные лампы и искровые разрядные контуры. Лампы обладают высокими эксплуатационными характеристиками, но возможность достижения очень коротких длительных импульсов излучения ограничена их собственной индуктивностью. Реально достижимы длительности импульсов излучения порядка 100 нс.

Искровые разрядные контуры, где искровой промежуток и накопитель энергии конструктивно представляют собой единое целое, значительно уступают газоразрядным лампам по ряду технических параметров, но позволяют получить длительность импульсов от единиц до десятков наносекунд при использовании специально подобранной смеси газов (с добавкой «гасящего» газа, например водорода).

Импульсный разряд в лампе имеет высокую температуру газа (до десятков тысяч градусов) и большую степень ионизации газа. Спектр излучения импульсных газоразрядных ламп зависит от мощности, выделяемой в разряде. При малой мощности вспышки спектр излучения близок к спектру ксеноновых ламп сверхвысокого давления. Мощные импульсные лампы по спектру излучения в видимой области спектра приближаются к излучению черного тела. В последние годы создан ряд новых импульсных источников излучения, основанных на взаимодействии ударных волн и встречно направленных потоков плазмы.

В качестве специальных газоразрядных источников излучения для оптической спектроскопии используются источники света с тлеющим разрядом, с полным катодом, с атомным пучком, дуговые лампы с парами различных металлов, источники излучения низкого давления с непрерывным спектром.

Одной из разновидностей газоразрядных источников света, нашедших широкое применение как источник освещения, являются люминесцентные лампы. Лампа представляет собой цилиндрическую стеклянную трубку, по концам которой вварены стеклянные ножки с укрепленными на них электродами. На внутреннюю поверхность трубки наносится тонкий слой люминофора. Лампа наполняется инертным газом или смесью инертных газов: аргоном, неоном, криптоном и др. Внутрь лампы вводится также дозированное количество ртути, которая при работе лампы переходит в парообразное

состояние. Газовый разряд в люминесцентных лампах происходит в парах ртути при низком давлении. В этих условиях газовый разряд генерирует главным образом ультрафиолетовое излучение и в небольшом количестве видимый свет. Преобразование ультрафиолетового излучения разряда в видимый свет основано на люминесценции некоторых веществ, например галофосфат кальция, галоиды — F и Cl, Sb и Mn, которые, поглощая ультрафиолетовое излучение, за счет полученной энергии начинают испускать видимый свет. В зависимости от природы и параметров люминофорного слоя меняется спектр испускаемого им света.

Выпускаемые промышленностью люминесцентные лампы различаются по номинальной мощности, цветности и спектральному составу излучения, форме трубки-колбы, способу включения и т. д.

Параметры некоторых люминесцентных ламп

Тип лампы	Мощность, Вт	Напряжение на лампе, В	Номинальный световой поток, лм	Форма трубки-колбы
ЛБ4-1	4	30	90	Прямолинейная
АБ65-3	65	110	4260	»
ЛБ 15	15	58	63	U-образная
ЛБ 40	40	108	2360	»
ЛБК22	22	66	850	Кольцевая
ЛБК40	40	103	2100	»
ЛБКВ30	30	108	1500	Квадратная

Если в рассмотренном выше случае генерирование излучения основано на двойном преобразовании энергии: превращении электрической энергии в энергию ультрафиолетового излучения за счет ионизации молекул нейтрального газа и паров ртути и последующего преобразования ультрафиолетового излучения в видимое свечение люминесцирующих твердых веществ, то в электролюминесцентных источниках излучения на твердых веществах преобразование происходит без промежуточных стадий, при непосредственном воздействии электрического поля или потока электронов на люминофор. К таким электролюминесцентным источникам излучения относятся порошковые, сублимированные, монокристаллические фосфоры, электролюминесценция которых возникает в сильных электрических полях или при

воздействии на них пучка электронов, а также инжекционные диоды (светодиоды), излучение которых обусловлено интенсивной рекомбинацией в результате инжекции через *p-n*-контакт в полупроводник неосновных носителей тока. По эффективности твердотельные электролюминесцентные источники излучения пока уступают лампам накаливания и газоразрядным источникам света. Однако они имеют преимущества: технологичность, надежность, большой срок службы и микроминиатюрность.

Явление катодolumинесценции, т. е. свечения различных фосфоров под действием электронного пучка, нашло применение в электронно-лучевых трубках и кинескопах, которые используются для визуальной и фотографической регистрации электрических сигналов и для прямого наблюдения изображения в телевизионных приемниках и видеоконтрольных устройствах. В зависимости от вида люминофора цвет свечения охватывает практически весь видимый диапазон спектра.

Свечение люминофоров под действием электрического поля нашло применение в электролюминесцентных конденсаторах. Принципиально конструкция электролюминесцентного конденсатора представляет собой тонкий слой изолятора, в среде которого располагаются кристаллы электролюминофора. Эта смесь помещается между двумя контактными электродами, к которым прикладывается постоянное или импульсное напряжение. Один из таких электродов должен быть прозрачным. Используемые в электролюминесцентных конденсаторах люминофоры (сублимат-фосфоры, порошковые фосфоры и соединения на основе сернистого цинка) возбуждаются в зависимости от вида люминофора при напряжениях от десятков до сотен вольт, при этом их средняя яркость свечения составляет 10—80 кд/м² в спектральном диапазоне 0,4—0,6 мкм с максимумом излучения в длине волны 0,58 мкм.

Выпускаемые в настоящее время светодиоды делятся на три группы: карбидокремниевые, фосфидогаллиевые и арсенидогаллиевые светодиоды. Первые две группы светодиодов предназначены для работы в качестве источников видимого света. Арсенидогаллиевые светодиоды используются как источники инфракрасного излучения. Параметры некоторых типов светодиодов приведены в таблице.

Параметры некоторых светодиодов

Тип лампы	Материал	Рабочая длина волны, нм	Мощ- ность излуче- ния, мВт	Яркость свечения, нт
АЛ102А	GaP	698	—	5
АЛ102В	GaP	565	—	20
АЛ106В	GaP	930	0,6	—
КЛ101В	SiC	590	—	20
АЛ103А	GaAs	950	10	—
АЛ301Б	GaAs	640	—	20

Все рассмотренные твердотельные электролюминесцентные излучатели нашли применение в радиоэлектронике для передачи и обработки информации.

ХИМИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Источники излучения, о которых рассказано в предыдущих разделах, используют для превращения в световое излучение энергию электрического тока. Эти излучатели могут создавать большие световые потоки, однако их применение связано с наличием достаточно мощных, как правило, стационарных источников электроэнергии (электрическая сеть, аккумуляторы).

В некоторых областях человеческой деятельности, например в военном деле, требуются мощные, компактные и подвижные источники излучения. Излучатели, использующие электроэнергию, из-за больших размеров источников питания часто не подходят для этой цели. Значительно удобнее оказываются источники излучения, использующие энергию химических реакций, которая высвобождается в процессе горения.

Напомним, что горение — это быстрый окислительно-восстановительный процесс с выделением тепла. Классическими примерами горения являются реакции окисления кислородом воздуха органических веществ или углерода: горение каменного угля, нефти, древесины и т. д. По скорости происходящих реакций горение отличается от других окислительно-восстановительных реакций — относительно медленного низкотемпературного окисления (ржавление, биохимическое окисление) и относительно быстрого взрывного превращения. Тепло, выделяющееся при горении, идет на поддержа-

ние самого процесса и на получение полезного эффекта, например, на создание светового потока.

Излучающим телом при горении, как правило, является пламя, т. е. нагретая до высоких температур газообразная среда, включающая конденсированные частицы.

Вещества, участвующие в процессе горения, могут находиться в любом агрегатном состоянии, как в газообразном, так и в конденсированном. В газовых системах весь процесс горения протекает в пламени. При горении конденсированных систем превращение вещества (например, испарение, терморазложение) частично происходит в конденсированной фазе. Более того, существует беспламенное (или безгазовое) горение, когда реакции целиком протекают в конденсированной фазе. Примером таких реакций является горение смесей металлов с некоторыми неметаллами, а также металлов с окислами металлов (термиты).

Излучение пламени характеризуется его спектром. В самом общем случае спектр пламени состоит из сплошного фона, полос и линий, которые возникают благодаря процессам, происходящим в пламени: образования в результате химических реакций возбужденных молекул, атомов и радикалов, возбуждения атомов за счет взаимных столкновений. Линии обусловлены излучением света свободными атомами или ионами при электронных переходах в их электронных оболочках. Полосы в ультрафиолетовой и видимой областях объяснены своим происхождением электронным переходам в молекулах, а полосы в инфракрасной области объясняются изменением квантового состояния колебательной и вращательной степеней свободы молекул. Сплошной спектр пламени обусловлен излучением нагретых до температуры окружающего газа конденсированных частиц. Это, как правило, сажистые частицы — продукт терморазложения углеродсодержащего горючего, частицы металлов или их окислов. В некоторых случаях появление участков непрерывного излучения может быть вызвано процессами рекомбинации ионов, ассоциации атомов или радикалов.

По виду спектра можно выделить три вида пламени.

Пламя с преобладающим сплошным спектром, как правило, имеет белый цвет либо слабую цветовую окраску. Поскольку энергия такого пламени излучается в

широких участках, то с его помощью удается получать источники, излучающие наибольшее (по сравнению с другими видами пламени) количество энергии на единицу массы сжигаемого топлива.

Окраска пламени с преобладающим линейчатым спектром зависит от того, в какой области находятся линии излучения. Пламя с таким спектром будет казаться бесцветным, если линии излучения лежат в ультрафиолетовой или инфракрасной областях, или иметь цвет, если яркие линии излучения атомов химического элемента (чаще всего металла) лежат в видимой части спектра.

Пламя третьего типа имеет смешанный линейчатый, полосатый и сплошной спектр. Это яркое пламя с цветовыми оттенками.

Пламя, образующееся при горении газов, может служить источником излучения при атомно-эмиссионном анализе вещества. Атомно-эмиссионный анализ основан на том, что возбужденные атомы любого химического элемента испускают линии излучения с определенной, присущей только этому элементу, длиной волны. Это позволяет определить химический состав исследуемого соединения. В некоторых видах газового пламени (например, в водородно-кислородном) развиваются температуры, достаточно высокие для того, чтобы произошла термодиссоциация сложных солей металлов, которые образуют природные минералы, и возбуждение атомов этих металлов. Возникающие при этом линии излучения позволяют определить химический состав минерала.

Существует научно-техническая дисциплина, называемая пиротехникой, одной из задач которой является изучение излучательных свойств пламени и разработка таких химических составов, которые при горении образуют пламя с необходимыми свойствами.

Пиротехнические составы представляют собой механические смеси твердых, тонко измельченных компонентов. Такие смеси горючего, окислителя и некоторых добавок равномерно перемешаны и, как правило, спрессованы. Добавками являются связующие вещества, ускорители или замедлители горения.

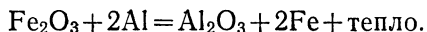
Вещества, используемые в качестве горючего, многочисленны. Это — металлы II—V групп Периодической системы Менделеева и органические соединения, часто

представляющие собой природные или искусственные полимеры.

В качестве окислителей используются неметаллы, как правило, О, иногда F, Cl и другие элементы. Реакции, в которых окислителем является О или F, приводят к образованию соединений с ионной связью (окислы и фториды металлов) или соединений с сильно поляризованной электронной связью (H_2O , CO_2 и др.). Связь между атомами в этих соединениях значительно прочнее, чем в исходных веществах (металлическая решетка в металлах или ковалентная связь в органических молекулах). Такое различие в энергиях связи и обеспечивает экзотермический эффект реакций окисления.

Кислород, содержащийся в атмосферном воздухе, может быть окислителем в реакции горения названных выше горючих. Однако процесс протекает интенсивнее, с большей полнотой окисления, если горючее и окислитель предварительно, до начала реакции, перемешаны в необходимой пропорции. Такое перемешивание достигается, если окислитель находится в исходном пиротехническом составе в виде химического соединения, которое при нагреве разлагается с выделением свободного кислорода. В пиротехнике в качестве таких соединений обычно используют соли щелочных и щелочно-земельных металлов, например, KClO_4 , KNO_3 , $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ и т. п.

Другой тип окислителей — окислы малоактивных металлов. Реакция вытеснения их более активными металлами протекает с выделением значительного количества тепла. Пример такой реакции — горение железоалюминиевого термита:



Пламена пиротехнических составов имеют сплошной и смешанный типы спектра, что, как отмечалось выше, позволяет получить наибольшее количество световой энергии на единицу массы топлива. Это достигается тем, что применяемые металлы (как правило, Mg, Al, Zr) при горении образуют окислы, имеющие высокие температуры плавления и кипения. Поэтому при горении частицы металла реакция окисления, протекающая на ее поверхности, приводит к образованию жидкой или твердой частицы окисла. Кроме того, пары окисла, об-

разовавшиеся в результате взаимодействия паров металла с кислородом, конденсируются в частицы окисла. Одновременно в пламени находятся сажистые частицы, получившиеся при терморазложении углеродсодержащих добавок. Именно присутствие в пламени конденсированных частиц окисла и сажистых частиц, которые имеют высокую излучательную способность, создает сплошной спектр излучения пиротехнических составов.

Пиротехнические составы с пламенем белого цвета и сплошном спектре излучения широко применяются в осветительных средствах, предназначенных для освещения местности в ночных условиях и ночной аэрофото-съемки.

В тех случаях, когда пламени необходимо придать цвет, в качестве окислителя используют соли щелочных и щелочноземельных металлов, атомы которых легко возбуждаются и имеют яркие спектральные линии в видимой области спектра. Для получения зеленой окраски используют $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$, красной — $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$, желтой — $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$.

Пиротехнические составы, образующие цветные пламена, применяются в световых сигнальных устройствах, а также для создания фейерверочных огней. Эти составы применяют и для трассеров, которые представляют собой таблетки пиросостава, запрессованные в корпуса пуль или снарядов. Горение трассеров делает видимой траекторию полета и облегчает пристрелку по быстро движущимся целям.

Как мишени и ложные цели в авиации и космонавтике широко используются пиротехнические инфракрасные излучатели. Они могут представлять собой устройства, аналогичные осветительным пиротехническим средствам, так как основная часть энергии излучения пламени со сплошным спектром лежит в инфракрасной области.

Другим типом инфракрасного излучателя является пиротехническая модель абсолютного черного тела. В этом случае излучение осуществляется из полости графитового конуса, стенки которого нагреваются малогазовым пиротехническим составом термитного типа: $\text{Al} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{V} + \text{BaCrO}_4$. Для этой цели могут также применяться и составы безгазового горения, в которых происходит реакция взаимодействия переходных металлов (титана, циркония, гафния и других металлов IV—

V групп Периодической системы) с неметаллами — бором, углеродом, кремнием, азотом.

К пиротехническим источникам излучения близки химические лампы-фотовспышки, предназначенные для получения мощных световых импульсов при удаленности от источников электроэнергии, необходимой для работы электроразрядных ламп-фотовспышек. Химическая лампа-фотовспышка представляет собой стеклянный баллон, заполненный стружкой металла (циркония, магния, титана) и кислородом или смесью кислорода с другими газами. Вещество, находящееся в баллоне, поджигается, например, с помощью ударного капсюля и сгорает в течение долей секунды, создавая яркую вспышку света. Давление в баллоне повышается скачком, и для предотвращения разлета осколков баллона его покрывают прозрачной полимерной пленкой, удерживающей осколки. Такая лампа излучает сплошной спектр с линиями излучения химических элементов, участвующих в реакции. Помимо фотографии, химические лампы-вспышки находят применение в оптической накачке лазеров.

ЛАЗЕРЫ

Лазеры как источники оптического излучения все более широко используются в технике, в научных исследованиях и медицине. Их уникальные оптические свойства — монохроматичность излучения, его когерентность, направленность, высокая интенсивность и поляризованность — обеспечивают принципиальную возможность широкого и эффективного их применения.

Понятие монохроматичности характеризует ширину спектра излучения. Излучение лазера квазимонохроматично или почти идеально монохроматично. Другими словами, оно чрезвычайно узкополосно. В то время как в современных узкополосных интерференционных светофильтрах полоса пропускания составляет 1—5 нм, ширина спектра газовых лазеров — 10^{-3} — 10^{-4} нм, твердотельных — 10^{-1} — 10^{-2} нм, полупроводниковых — 1—10 нм. Это свойство лазеров широко используется в спектроскопии и при интерферометрических геодезических измерениях.

Когерентность излучения заключается в согласован-

ности между фазами волны, образующей данное излучение. Излучение пространственно когерентно, если в любой момент времени наблюдается постоянное распределение фазы волны в пространстве, т. е. сохраняется форма волнового фронта колебания. Излучение, прошедшее через данную точку пространства, когерентно во времени, если фаза волны в этой точке меняется регулярно. Излучение лазеров не полностью когерентно, но по сравнению с тепловыми или люминесцентными излучателями степень его когерентности настолько высока, что оно таковым считается. Свойство когерентности излучения лазеров используется для передачи и приема информации на оптических частотах, для создания эталонов длины, в интерферометрах. В каждом из этих применений лазеры обеспечивают получение параметров, не достижимых для приборов с обычными источниками излучения.

Направленным называют излучение, распространяющееся в пределах небольшого телесного угла. Излучение обычных некогерентных источников распределено в пространстве внутри большого телесного угла, т. е. оно оказывается ненаправленным. Направленность — одно из основных свойств излучения лазеров. Без применения дополнительной оптической системы расходимость пучка газовых лазеров обычно составляет единицы угловых минут, твердотельных — до нескольких десятков минут, полупроводниковых — от единиц до десятков градусов. Эта особенность излучения лазера используется в приборах для линейных и угловых измерений.

Понятие интенсивности применяется для оценки фотометрических величин, с помощью которых характеризуется излучение: сила света, яркость и т. д. При больших значениях этих величин, говорят, что излучение интенсивно. Благодаря высокой степени направленности излучение лазера интенсивно даже в том случае, когда мощность его сравнительно невелика. Оказывается, что при одной и той же потребляемой мощности сила излучения лазеров значительно интенсивнее, чем сила обычных источников. Например, лампа накаливания мощностью 66 Вт имеет силу света 5 Вт/ср, а лазер типа ЛГ-55 с потребляемой мощностью 66 Вт, мощностью излучения всего $2 \cdot 10^{-3}$ Вт и расходимостью 10 мин характеризуется силой света 300 Вт/ср. Что касается мощ-

ных лазеров, то они являются самыми интенсивными источниками оптического излучения.

Поляризованное излучение можно представить электрическим вектором, величина и направление которого в данной точке пространства закономерно меняются с течением времени. Излучение почти всех типов лазеров поляризовано. Свойство поляризованности излучения лазера используется в различных оптико-электронных приборах, принцип действия которых основывается на различных эффектах в поляризованном излучении, а также для улучшения параметров приборов, поляризованность которых не имеет принципиального значения. В первом случае примером могут служить приборы для измерения и контроля технических или физических величин. Во втором случае за счет поляризованности уменьшаются потери при модуляции излучения или увеличивается отношение сигнал/фон путем применения в приемной системе поляризационных светофильтров.

Основные параметры лазеров можно разделить на две группы: параметры излучения, знание которых необходимо при оценке принципиальной физической возможности решения той или иной задачи, и эксплуатационные параметры, определяющие технико-экономическую эффективность применения лазера в качестве излучателя. К первым относятся энергетические, пространственные и частотно-временные параметры. Ко вторым — коэффициент полезного действия, потребляемая мощность, рабочая температура, время непрерывной работы и т. д.

Параметры излучения зависят от режима работы лазера, который может быть непрерывным, пульсирующим, режимом одиночных импульсов. В непрерывном режиме работает большинство газовых лазеров при комнатной температуре, а также некоторые твердотельные и полупроводниковые лазеры при охлаждении до 77 К и ниже. При импульсном (пульсирующем) режиме излучение лазера происходит в виде регулярной последовательности импульсов, причем длительность импульсов гораздо меньше периода их повторения. Пульсирующий режим характерен для полупроводниковых и некоторых газовых лазеров.

В режиме одиночных импульсов период их повторения определяется временем, необходимым для зарядки элементов блока питания или охлаждения прибора.

Длительность импульса обычно не превышает 10^{-3} с, а промежутки между ними гораздо больше и достигают десятков минут. В таком режиме работают твердотельные лазеры. Разновидностью его является режим гигантских импульсов, когда мощность импульса достигает десятков гигаватт, а длительность — десятых долей наносекунд.

При оценке эффективности применения лазеров следует иметь в виду, что сравнивать между собой необходимо не только источники излучения, но и приборы, в состав которых они входят.

Не останавливаясь на анализе всех параметров и характеристик лазеров, которые подробно рассмотрены в специальной литературе, приведем краткий обзор современных промышленных лазеров. Данные о некоторых из них приведены в таблице.

Газовые лазеры можно классифицировать по различным признакам. В зависимости от вида частиц, энергетические уровни которых используются для получения инверсии, принято различать атомарные, ионные и молекулярные лазеры, по режиму работы — непрерывные, импульсные, одномодовые, многомодовые, односторонние и т. д. В газовых лазерах в качестве активного вещества используются чистые газы, их смеси, а также пары некоторых веществ. Обычный газовый лазер представляет собой стеклянную или кварцевую трубку со впаянными электродами, служащими для создания разряда постоянным током. Если используется высокочастотный разряд переменного тока, то электроды в виде поясков одеваются на трубку. Ширина линий излучения в газовых лазерах составляет порядка 10^{-6} — 10^{-7} мкм.

В атомарных газовых лазерах активной средой служат нейтральные атомы — смесь гелия и неона. Весьма распространенные гелий-неоновые лазеры имеют длины волн генерируемого излучения—0,6328; 1,153 и 3,39 мкм, а также сравнительно небольшую мощность излучения — не более 100 мВт на длинах волн 0,6328 и 1,153 мкм и нескольких сотен милливольт на 3,39 мкм.

В ионных газовых лазерах для создания индуцированного излучения используется возбуждение ионов некоторых газов (Xe, Kr, Ar, Ne, Cl), а также ионы P, S и некоторых металлов. Наиболее распространены лазеры на ионах Ag, позволяющие получать значительные мощности излучения (от единиц до 30—50 Вт) в не-

Параметры некоторых лазеров

Тип лазера	Марка и название лазера	Длина волны генерации, мкм	Режим работы	Плоский угол расходимости, угл. мин	Мощность или энергия генерации
Газовые	Гелий-неоновый ЛГ-55	0,6328	Непрерывный Многомодовый Одномодовый	$<10'$ $<5'$	$2 \cdot 10^{-3}$ Вт $1 \cdot 10^{-3}$ Вт
	На углекислом газе «Прометей-50»	10,6	Непрерывный Многомодовый	—	50 Вт
	Аргоновый ЛГ-109	0,488	Непрерывный Многомодовый	$6'$	1 Вт
	Гелий-кадмиевый КЛ-1	0,4416	Непрерывный Одномодовый	$3'$	$5 \cdot 10^{-3}$ Вт
	Азотный «Сигнал-2»	0,337	Импульсный $\tau=15$ нс $f=220$ Гц	$3'$	$(5-10) \cdot 10^3$ Дж
Твердотельные	Рубиновый ОГМ-20	0,6943	Импульсный $\tau=20$ нс $f=1$ Гц	$<2'$	0,4 Дж
	Неодимовый ГСИ-1	1,0600	Импульсный $\tau=7 \cdot 10^{-4}$ с $f=0,1$ Гц	$70'-80'$	10^5 Вт 75 Дж
	Рубиновый ГОР-300	0,6943	Импульсный $f=0,003$ Гц	$60'$	300 Дж
	Рубиновый «Раздан-2А»	0,6943	Импульсный $\tau=0,5$ мс $f=2$ Гц	$50'$	2 Дж
Полупроводниковые	На арсениде галлия «Колибри»	0,89—0,91	Импульсный $\tau=0,07-0,15$ мкс $f=(400-2000)$ Гц	—	1—5 Вт
	КГС-1М с электронным возбуждением	0,83—0,86	Импульсный $\tau=10^{-7}-10^{-9}$ с $f<1000$ МГц	$<15^\circ$	>1 кВт

прерывном режиме. Эти лазеры могут работать и в импульсном режиме. Рабочий ток в номинальном режиме составляет несколько десятков ампер, коэффициент полезного действия — до 0,1%, диапазон спектра излучения — от 0,4545 до 0,5145 мкм с основной длиной волны 0,4888 мкм.

В молекулярных газовых лазерах ток разряда возбуждает молекулы газа. Наиболее часто рабочая смесь состоит из углекислого газа с добавкой N и He. Оптимальные значения разрядного тока (тлеющий разряд) составляют десятки и сотни миллиампер при напряжении на трубке до 10 кВ. Общими характеристиками газовых лазеров на углекислом газе являются длина волны излучения 10,6 мкм и большая мощность излучения, чем у других газовых лазеров (несколько десятков ватт в непрерывном режиме и несколько мегаватт в импульсном). Для повышения мощности излучения активную среду непрерывно заменяют новой, прокачивая ее между зеркалами резонатора.

В рассмотренных газовых лазерах активное вещество возбуждается с помощью электрического разряда. Поиски способов повышения мощности газовых лазеров привели к созданию так называемых газодинамических лазеров. В них накачка осуществляется путем нагрева смеси газов (CO_2 , N, He) с последующим быстрым расширением со сверхзвуковой скоростью. В дозвуковой части трубки газ нагревается до температуры выше 1000°C и находится под давлением в десятки атмосфер. Затем он проходит через сопло, форма которого заставляет газ двигаться со сверхзвуковой скоростью. При этом газ быстро расширяется и его температура уменьшается. Релаксация населенности возбужденных уровней CO_2 происходит с разной скоростью. Релаксация верхнего уровня протекает так медленно, что на расстоянии до 1 м от сопла населенность остается практически постоянной, в то время как релаксация нижнего рабочего уровня происходит за время меньшее, чем требуется для расширения.

Резонатор в газодинамическом лазере устанавливается так, что его ось перпендикулярна направлению движения газа. Получение высоких значений температуры и давления в дозвуковой камере достигается различными путями, например с помощью электрического разряда, сжигания топлива, взрыва и т. д. В настоящее

время газодинамические лазеры на углекислом газе развивают мощность до 60 кВт при многомодовом излучении и до 30 кВт в одномодовом. В принципе от них можно получить непрерывную мощность до 10^6 кВт.

Кроме электрического разряда и нагрева смеси газов, инверсия населенностей уровней атомов и молекул в газовом лазере может создаваться в результате химических реакций, при которых образуются атомы или радикалы в возбужденных состояниях. Так как обычные реакции протекают довольно медленно, они непригодны для создания инверсии населенностей, ибо возбужденные атомы, прежде чем их накопится достаточно много, успеют перейти в основное состояние и лазер не будет генерировать излучение.

По этой причине химические газовые лазеры могут работать только на быстротекущих реакциях, таких, как фотодиссоциация молекул, взрыв или химические реакции между атомами или молекулами во встречных пучках атомов или молекул различных веществ. Химический метод создания инверсий населенностей принципиально допускает создание лазеров с очень высокими КПД и выходной мощностью. В импульсных химических лазерах генерацию инициируют фотовспышкой или электрическим разрядом. В непрерывно работающих лазерах смесь приготавливается непосредственно перед впуском ее в резонатор, и химическая реакция происходит без внешнего инициирования. Примерами такого рода устройств являются лазеры, работающие на смеси D, F, CO₂ и He, и на фотодиссоциации молекулы CF₃I.

В качестве активного вещества твердотельных лазеров используются кристаллические или аморфные диэлектрики в виде цилиндров, призм или стержней, на отполированные торцы которых наносятся зеркальные покрытия, образующие резонатор. Твердотельные лазеры работают, как правило, в импульсном режиме. Для них характерны (по сравнению с газовыми) гораздо большая мощность в импульсе, меньшая когерентность излучения, большие габариты и масса.

Наиболее распространенным материалом для активного вещества в твердотельном лазере является синтетический рубин (кристаллическая окись алюминия, в которой часть атомов Al заменена на ионы Cr). Рубиновые лазеры используются в импульсном и непрерывном режиме излучения. В импульсном режиме при дли-

тельности импульса 10 мс средняя мощность в импульсе составляет до 1 кВт. При работе в непрерывном режиме мощность составляет десятки милливатт, КПД не превышает 1%.

Существует большое количество материалов, подобных рубину. Это прежде всего стекло, в которое введены атомы Nd. С успехом применяется для создания лазера флюорит кальция, в который введены атомы Dy или Sm, а также кристаллы иттрий-алюминиевого граната. Все эти вещества — твердые тела, рабочими в них являются атомы введенных примесей. Разные материалы дают световое излучение с различной длиной волны. Так, рубин излучает свет с длиной волны 0,6943 мкм, неодимовое стекло — 1,06 мкм, флюорит кальция с диспрозием генерирует излучение с длиной волны 2,36 мкм, а иттрий-алюминиевый гранат — 2,123 мкм.

В твердотельных лазерах в качестве источников излучения накачки применяют ксеноновые газоразрядные лампы и галогенные лампы накаливания. Начиная использоваться криптоновые лампы, поскольку их применение увеличивает КПД лазера при его работе как в непрерывном, так и в импульсном режимах.

Основными достоинствами полупроводниковых лазеров являются малые габариты и масса, небольшая потребляемая мощность, возможность осуществления модуляции током накачки.

Принцип действия полупроводниковых лазеров во многом схож с принципом действия светодиодов. При достаточно больших напряжениях, прикладываемых к *p-n*-переходу, амплитуда излучения усиливается при прохождении через кристалл полупроводника, образующий резонатор. Излучение становится индуцированным.

Эффект индуцированного излучения получен для многих полупроводниковых материалов в диапазоне от 0,33 до 31 мкм. Для его создания используются оптическое возбуждение (фотолюминесценция), возбуждение пучком быстрых электронов и главным образом инжекция носителей в *p-n*-переход. Инжекция носителей осуществляется путем подачи импульсов тока длительностью от нескольких микросекунд до десятых долей микросекунды с частотой до сотен килогерц. Пороговая плотность тока, необходимая для получения индуцированного излучения, составляет 7—20 кА·см⁻², при этом,

как правило, необходимо охлаждение кристалла до 77 и даже до 4 К.

Наибольшее распространение получили полупроводниковые лазеры с активным элементом из арсенида галлия, накачка которого производится с помощью инъекции носителей тока или электронным возбуждением. В опытных образцах лазеров на арсениде галлия при температуре кристалла 4 К получена мощность непрерывного излучения 7 Вт при мощности накачки 30 Вт. Для промышленных образцов полупроводниковых лазеров достигнуты мощности излучения в импульсном режиме свыше 1 кВт и КПД до 80%.

Размеры *p-n*-перехода в полупроводниковых лазерах, как правило, составляют десятки микрометров, области свечения — единицы и десятые доли микрометра, углы расхождения — единицы и даже десятки градусов. Ширина спектральной линии излучения обычно равна $1,5 \cdot 10^{-3}$ мкм. Иногда удается уменьшить ее до 10^{-5} мкм. Использование так называемых гетероструктур, ограничивающих с одной или двух сторон *p-n*-переход, позволило уменьшить ширину активной области полупроводника до нескольких микрометров. Так как гетероструктура препятствует диффузии электронов и дырок из активной области, то инверсия достигается при гораздо меньшей плотности тока накачки, чем в обычных полупроводниковых лазерах. В свою очередь, это позволяет при соответствующем теплоотводе работать в непрерывном режиме при комнатной температуре. Кроме того, для увеличения средней мощности излучения полупроводниковых лазеров активный элемент делается в виде решетки, состоящей из большого числа лазерных диодов. Так, решетка из 100 диодов из арсенида галлия позволяет получить среднюю мощность излучения 30—40 Вт при пиковой мощности 1,5—2 кВт.

В жидкостных лазерах активной средой являются жидкие при комнатной температуре растворы с активаторами. Жидкостные лазеры в определенной мере сочетают преимущества твердотельных и газообразных и имеют специфические достоинства. В них может быть достигнута концентрация активных ионов того же порядка, что и в лазерах на неодимовом стекле. Это позволяет получать большие энергии и мощности излучения с единицы объема рабочего вещества. В результате повышается значение предельной энергии излучения ла-

зера, так как она возрастает с увеличением рабочего объема. Оптические характеристики активной среды жидкостных лазеров, как и у газовых лазеров, изотропны и постоянны по объему, что обеспечивает высокую степень пространственной когерентности и направленности излучения жидкостного лазера. Жидкостные лазеры обладают важным преимуществом — они позволяют применять циркуляцию активной жидкости через лазерную кювету (режим прокачки рабочего вещества). Прокачка активной жидкости позволяет реализовать как периодический, с большой частотой следования импульсов, так и непрерывный режим работы лазера.

В качестве активаторов в жидкостных лазерах используются органические комплексные соединения редкоземельных элементов, неорганические жидкости и красители.

Основные достоинства лазеров на органических красителях заключаются в возможности получения генерации на любых частотах в видимой и ближней инфракрасной области спектра, плавном изменении (перестройка) частоты, безынерционности и низкой стоимости. Лазеры на красителях хорошо работают в периодическом режиме, причем нагрев активного вещества устраняется циркуляцией раствора через кювету, находящуюся в резонаторе. Большие коэффициенты усиления позволяют использовать такие системы, как широкополосные квантовые усилители света.

Источники оптического излучения все шире применяются в современной технике и научных исследованиях. Развитие таких передовых отраслей, определяющих научно-технический прогресс, как квантовая электроника, управляемый термоядерный синтез, оптическая связь, спектральный анализ, неконтактное измерение температуры и др., требует все более совершенных типов оптических излучателей.

В связи с этим понятен интерес, проявляемый к литературе, посвященной источникам оптического излучения.

Эта книга преследует две цели. Во-первых, дать читателю знания о физических основах оптического излучения, его видах и основных закономерностях. Во-вторых, кратко ознакомить читателя с существующими видами источников излучения, их конструкцией и техниче-

скими параметрами, характеризующими работу излучателей.

Все замечания читателей, касающиеся данной книги, будут приняты авторами с благодарностью.

Литература

Гуторов М. М. Основы светотехники и источники света. М., «Энергия», 1968.

Квантовая электроника. Маленькая энциклопедия. Отв. ред. М. Е. Жаботинский. М., «Сов. энциклопедия», 1969.

Литвинов В. С., Рохлин Г. Н. Тепловые источники оптического излучения. М., «Энергия», 1975.

Фугенфиров М. И. Газоразрядные лампы. М., «Энергия», 1975.

Воронин В. Г., Гребнев А. К., Кривоносов А. И. Схемы автоматики с фоточувствительными и излучающими полупроводниковыми приборами. М., «Энергия», 1972.

Шидловский А. А. Основы пиротехники. М., «Машиностроение», 1973.

Климков Ю. М. Основы расчета оптико-электронных приборов с лазерами. М., «Сов. радио», 1978.

Якушенков Ю. Г. Основы оптико-электронного приборостроения. М., «Сов. радио», 1977.

Мальцев В. М., Мальцев М. И., Кашпоров Л. Я. Основные характеристики горения. М., «Химия», 1977.

Бураковский Т., Пизиньский Е., Саляк А. Инфракрасные излучатели. М., «Энергия», 1978.

Маршак И. С. Импульсные источники света. М.—Л., Госэнергоиздат, 1963.

Похил П. Ф., Мальцев В. М., Зайцев В. М. Методы исследования процессов горения и детонации. М., «Наука», 1969.

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	3
Основные понятия	3
Тепловое излучение	9
Люминесценция	16
Лазерное излучение	20
ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ	31
Источники теплового излучения	31
Источники люминесцентного излучения	39
Химические источники излучения	48
Лазеры	53
Литература	63

*Владимир Михайлович Мальцев,
Валерий Алексеевич Селезнев,
Владимир Алексеевич Андреев*

ОПТИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Гл. отраслевой редактор *В. П. Демьянов*
Редактор *К. А. Кутузова*
Мл. редактор *Н. А. Львова*
Обложка художника *М. А. Дорохова*
Худож. редактор *М. А. Гусева*
Техн. редактор *С. А. Птицына*
Корректор *В. В. Каночкина*

ИБ № 2303

Т 13216. Индекс заказа 94008. Сдано в набор 27.04.79. Подписано к печати 27.06.79. Формат бумаги 84×108¹/₃₂. Бумага типографская № 1. Бум. л. 1,0. Печ. л. 2,0. Усл. печ. л. 3,36. Уч.-изд. л. 3,46. Тираж 46 480 экз. Издательство «Знание». 101835, ГСП, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Заказ 869. Типография Всесоюзного общества «Знание», Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.
Цена 11 коп.

