

ФИЗИКА

ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ



1983/2

Ю.П. Тимофеев

М.В. Фок

С.А.Фридман

ВИДИМ
В НЕВИДИМОМ
СВЕТЕ



ЗНАНИЕ

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ

ФИЗИКА

2/1983

Издается ежемесячно с 1964 г.

Ю. П. Тимофеев,

кандидат физико-математических наук

М. В. Фок,

доктор физико-математических наук

С. А. Фридман,

кандидат технических наук

**ВИДИМ
В НЕВИДИМОМ
СВЕТЕ**

Издательство «Знание» Москва 1983

ББК 22.344

Т 41

Юрий Петрович ТИМОФЕЕВ — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Физического института им. П. Н. Лебедева АН СССР, занимается исследованиями физических процессов в различных классах кристаллофосфоров.

Михаил Владимирович ФОК — доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Физического института им. П. Н. Лебедева АН СССР, специалист в области кинетики люминесценции твердых тел при различных способах их возбуждения.

Самуил Аронович ФРИДМАН — кандидат технических наук, старший научный сотрудник Физического института им. П. Н. Лебедева АН СССР, занимается разработкой новых люминофоров и развитием их практических применений.

Рецензент: Валентин Александрович Фабрикант, академик АПН СССР, доктор физико-математических наук, профессор.

Тимофеев Ю. П. и др.

Т41 Видим в невидимом свете. — М.: Знание, 1983. — 64 с. — (Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Физика»; № 2).

11 к.

В брошюре рассказывается о различных классах люминофоров, позволивших делать видимыми изображения в любых участках спектра электромагнитных волн — от гамма-квантов до радиоволн. Рассмотрена физика процессов, происходящих в люминесцентных экранах, и приведены примеры их применений для просвечивания материалов и объектов, не прозрачных в видимом свете. Обсуждаются общие проблемы согласования параметров изображения со свойствами человеческого глаза.

Брошюра рассчитана на читателей, интересующихся достижениями современной физики.

1704050000

ББК 22.344
535

© Издательство «Знание», 1983 г.

ВВЕДЕНИЕ

Световые и звуковые волны служат основными носителями информации об окружающем нас мире; человечество весьма широко их использует как в разносторонних научных исследованиях, так и в повседневной жизни. Зрение по количеству и качеству получаемой с его помощью информации далеко опережает слух, что имеет простое физическое обоснование, связанное прежде всего с огромным различием длин волн видимого света и слышимого звука: менее 1 мкм для света и сантиметры и более для звука. Действительно, хорошо известно, что минимальные размеры изображения, создаваемого с помощью любого волнового процесса, не могут быть меньше соответствующей длины волны. Поэтому, несмотря на соизмеримые размеры органов зрения и слуха, в человеческих глазах могут возникать оптические изображения, содержащие до 10^5 независимых элементов изображения с различной интенсивностью световых сигналов, которые передают очень большое количество информации об окружающих нас объектах. В то же самое время в ушах человека (да и слона тоже) не уместится даже один элемент звукового изображения, поэтому никакого изображения в них и не возникает.

Конкурентоспособность слуха несколько повышается благодаря тому, что диапазон частот слышимых звуков (более 8 октав) примерно в 10 раз больше диапазона частот видимого света (менее 1 октавы). Однако зрение может стать и еще более информативным, поскольку диапазон электромагнитных волн, доступный для современной техники (от малых долей ангстрема для γ -лучей при ядерных реакциях до стокилометровых радиоволн), несоизмеримо шире диапазона звуков (от

микрон для ультразвука до километров для инфразвука).

Для этого необходимо только с помощью каких-то технических средств преобразовать в видимые невидимые изображения, полученные в достаточно коротковолновых электромагнитных излучениях. А изображения предметов в видимых и невидимых лучах отнюдь не тождественны между собой и в ряде случаев позволяют получать принципиально новую информацию об окружающем нас мире. Так, «портрет» человека при просвечивании рентгеновскими лучами (его скелет) или «портрет» в собственном тепловом излучении (распределение теплых и холодных мест на коже) очень мало похож на привычный облик этого человека.

Это не просто забавный факт, а основа современных физических методов диагностики многих серьезных заболеваний. Видение в невидимых лучах дает возможность заглянуть внутрь многих промышленных материалов (например, полупроводниковых), не прозрачных в видимом свете, и обнаружить скрытые в них дефекты. Наконец, прозрачность окон атмосферы, расположенных в инфракрасной области спектра, существенно выше, чем в видимом свете, что открывает возможности для дальновидения.

В связи со сказанным становится понятным, сколь важно получение изображений предметов в невидимой области спектра. Для этого в настоящее время разрабатывают самые различные методы преобразования невидимых изображений в видимые. Ниже мы остановимся на одном из наиболее универсальных методов такого преобразования, позволившем «увидеть» изображения предметов, начиная от γ -лучей вплоть до сверхвысоко-частотных радиоволн. Он основан на применении явления люминесценции, которое было известно еще в средние века, но стало понятным лишь в XX столетии, после создания квантовой теории. Фундамент теории люминесценции был заложен советской школой, созданной академиком С. И. Вавиловым (1891—1951 гг.), выдающимся физиком-оптиком, замечательным организатором и популяризатором советской науки. Только глубокое научное понимание физики процессов, происходящих в люминесцирующих веществах, может служить надежной основой для развития их многочисленных применений в современной науке и технике. Визуализация не-

видимых изображений, о которой мы будем рассказывать, — это одно из весьма перспективных направлений в применении люминесценции наряду с такими известными областями ее применения, как светотехника, телевидение, а также люминесцентный анализ объектов как неорганического, так и органического происхождения.

ЛЮМИНЕСЦЕНТНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СВЕТА

В большинстве случаев при визуализации изображений используют уже упоминавшееся выше явление люминесценции. Для этого изготавливают экраны, покрытые специальными веществами — люминофорами, способными ярко светиться под действием невидимых лучей или резко изменять под их влиянием яркость своего свечения, возбужденного другим, дополнительным источником. Кстати, слова «люминофор», «фосфор» (а заодно и «светофор») в русском переводе значат одно и то же: «светоноситель», только в первом слове для понятия «свет» применен латинский корень, во втором — греческий, а в третьем — русский.

Электромагнитные излучения различных длин волны преобразуются в видимый свет с помощью различных классов люминофоров: люминесцирующих красителей, кристаллофосфоров, кооперативных люминофоров и т. д. Происходящие в них физические процессы существенно различаются. Однако прежде чем перейти к их рассмотрению, необходимо остановиться на некоторых общих свойствах люминесценции. В изучение этого явления большой вклад внесла советская школа, созданная С. И. Вавиловым, который, в частности, первый доказал, что люминофоры — весьма эффективные преобразователи энергии в световую.

Говоря о специфике люминесцентного преобразования электромагнитного излучения различных длин волны в видимый свет, необходимо вспомнить о квантовой природе излучения. Действительно, каждой длине волны λ соответствует определенный квант, т. е. минимальная порция энергии E , причем и λ связаны простым соотношением:

$$E(\text{эВ}) = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1,234}{\lambda}, \quad (1)$$

где h — постоянная Планка, c — скорость света, ν — частота излучения, Гц, а λ выражена в микрометрах.

Квант излучения $h\nu_{\nu}$, поглощаясь в люминофоре, создает в нем одно возбужденное состояние атома, молекулы или группы молекул, которое мы будем называть элементарным возбуждением. Далее в веществе происходят различные, иногда весьма сложные процессы преобразования энергии этого элементарного возбуждения. В конечном счете вещество возвращается в начальное (невозбужденное) состояние, причем этот переход может сопровождаться испусканием квантов видимого света $h\nu_c$. В соответствии с диапазоном длин волны видимого света (0,4—0,75 мкм) величина его квантов лежит в пределах 1,64—3,1 эВ.

Даже не конкретизируя природы элементарных возбуждений (определяющейся энергетической структурой вещества), легко заметить принципиальное различие в визуализации излучений, более коротко- или длинноволновых, чем видимый свет. Действительно, в первом случае энергия кванта возбуждающего излучения $h\nu_{\nu}$ больше энергии кванта видимого света $h\nu_c$. Избыток энергии $h\nu_{\nu} - h\nu_c$ сравнительно легко рассеивается в веществе, превращаясь в энергию колебаний отдельных молекул или всей кристаллической решетки, т. е. в конечном счете переходит в тепло.

Совсем другое дело, если мы хотим сделать видимым более длинноволновое излучение. В этом случае энергия возбуждающих квантов меньше энергии квантов видимого света, которые должны быть испущены люминофором. При испускании каждого кванта эту недостачу нужно каким-то образом восполнять, что не так-то просто сделать. Еще до создания квантовой теории Дж. Стокс на основании опытных данных выдвинул носящее его имя правило, согласно которому возбуждать люминесценцию могут только излучения меньших длин волн.

Запрет Стокса был обобщен и несколько ослаблен благодаря исследованиям Е. Ломмеля и С. И. Вавилова. Согласно их наблюдениям в длинноволновую по отношению к возбуждающему излучению область должны быть сдвинуты лишь максимумы или центры тяжести спектров люминесцентного излучения, но небольшое количество квантов более коротковолновых, чем возбуждающие, все же может испускаться. Эту часть спектра люминесценции принято называть антистоксовой, ибо

ее существование нарушает запрет Стокса. Возможность испускания квантов большей энергии возникает благодаря использованию части тепловой энергии люминофора. Однако по мере уменьшения $h\nu_B$ (т. е. по мере роста недостачи энергии, которую необходимо восполнять) вероятность этого процесса уменьшается по экспоненциальному закону:

$$P(h\nu_B) \sim \exp\left(-\frac{h\nu_0 - h\nu_B}{kT}\right), \quad (2)$$

где $h\nu_0$ — величина, обычно даже несколько большая энергии кванта, соответствующего центру тяжести спектра люминесценции, а kT — средняя энергия теплового движения. Соответственно уменьшается и квантовая эффективность преобразования излучения покрывающим экраном слоем люминофора, т. е. отношение числа квантов, испускаемых слоем люминофора, к числу падающих на него квантов света, возбуждающего люминесценцию. Полагая в этой формуле $h\nu_0$ соответствующей длинноволновой границе видимого света, легко видеть, что эффективность возбуждения свечения будет меньше 1% при $h\nu_B = 1,52$ эВ, т. е. при $\lambda = 0,81$ мкм. Как видно, такая антистоксова люминесценция практически не пригодна для визуализации даже самых коротковолновых инфракрасных излучений.

Вопрос о причинах быстрого падения эффективности свечения в антистоксовой области спектра вызывал оживленные споры среди ведущих специалистов по люминесценции, поскольку он тесно связан с более общей проблемой возможности получения энергетического выхода свечения выше единицы. Действительно, представим себе, что в этой области на каждый поглощенный квант возбуждающего излучения испускается один квант света. В стоксовой области это уже практически реализовано для ряда кристаллов и растворов, где на 100 поглощенных квантов испускается по крайней мере 95 квантов. Но если такое положение сохранится и в антистоксовой области, то это будет означать, что энергетический КПД процесса преобразования станет выше 1. А как же тогда закон сохранения энергии и знаменитые начала термодинамики? Оказывается, что здесь все в порядке при условии, что люминофор черпает тепловую энергию из окружающего пространства, работая в качестве холодильного устройства. Не противо-

речит это и второму началу термодинамики, т. е. принципу возрастания энтропии для необратимых процессов. Количественное обоснование этого важного вывода недавно дала Ю. П. Чукова, которая строго рассчитала термодинамические пределы КПД люминесценции при различных условиях ее возбуждения.

Однако для визуализации важен не сам по себе КПД процессов внутри люминофора, а общая эффективность преобразования, которая во столько раз меньше, во сколько поток излучения, поглощенный в люминофоре, меньше падающего. Поскольку число атомов или молекул, обладающих некоторым избытком тепловой энергии, уменьшается с ее ростом по экспоненциальному закону, то даже при постоянном КПД таким же образом будет падать и поглощение квантов с недостаточной энергией. Именно это обстоятельство лежит в основе формулы (2), показывающей непреодолимые трудности визуализации для антистоксовой области путем использования запасов тепловой энергии люминофоров.

ВНУТРИЦЕНТРОВАЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ

Как следует из правила Стокса, проще всего визуализировать ультрафиолетовое изображение, часть энергии возбуждающего кванта после его поглощения в веществе обычно легко преобразуется в тепло. Экран для визуализации ультрафиолетового изображения можно сделать, растворив краситель в прозрачном лаке и нанеся раствор тонким слоем на прозрачную подложку. В таких слоях весь процесс преобразования энергии от поглощения кванта возбуждающего излучения до испускания кванта видимого света протекает в каждой молекуле красителя независимо от всех остальных. Этот механизм люминесценции называется внутрицентровым. Он характерен не только для растворов красителей, но и для разреженных газов, а иногда наблюдается и в кристаллах. В более сложных случаях этот механизм работает на последнем этапе преобразования энергии. Поэтому мы рассмотрим его подробно.

В результате поглощения кванта возбуждающего излучения молекула переходит в возбужденное электронное состояние, которое, как правило, отличается от невозбужденного также и равновесным расположением атомов, однако этот переход происходит так быстро, что

они не успевают занять свое новое положение равновесия* и начинают колебаться вокруг него. На возбуждение этих колебаний расходуется часть энергии поглощенного кванта. В дальнейшем колебания затухают, потому что энергия передается окружающей среде. Испускание света происходит обычно уже после того, как молекула пришла в равновесие с окружающей средой. Но после испускания света атомы вновь оказываются в неравновесном положении и колебания возникают снова, на этот раз вокруг нового положения равновесия, соответствующего невозбужденному электронному состоянию. Их энергия также постепенно передается в окружающую среду. Таким образом, энергия поглощенного кванта расходуется, как правило, в три этапа: два раза на возбуждение колебаний молекулы и один раз на испускание кванта света. Однако если квант возбуждающего излучения поглотила уже колеблющаяся молекула, энергия ее колебаний может частично присоединиться к энергии этого кванта. Тогда и возникает антистоксова люминесценция.

Все эти энергетические соотношения легко понять, рассмотрев так называемую энергетическую диаграмму молекулы, изображенную на рис. 1. На этой диаграмме по горизонтали отложено расстояние между атомами, а по вертикали — соответствующая ему энергия молекулы. Нижняя кривая (1) относится к невозбужденному, а верхняя — к возбужденному электронному состоянию. В соответствии с принципом Франка—Кондона все стрелки переходов вертикальны (расстояние между атомами не успевает измениться). Сплошными горизонтальными линиями обозначены уровни колебательной энергии для невозбужденного и возбужденного электронных состояний. Обычно в возбужденном состоянии молекулы ее атомы несколько слабее связаны между собой, и потому кривая 2 поднимается не так круто, как кривая 1, а расстояние между колебательными уровнями в возбужденном электронном состоянии несколько меньше, чем в не возбужденном.

На рисунке отмечено также важное обстоятельство, вытекающее из квантовой механики, — даже в состоя-

* Такое представление об оптических переходах называется принципом Франка—Кондона по имени физиков, впервые четко его сформулировавших.

нии с наименьшей колебательной энергией она не равна нулю* и колебания не прекращаются полностью. Поэтому атомы не всегда находятся на расстоянии, соответствующем минимуму потенциальной энергии, просто на этом расстоянии они бывают чаще, чем на других расстояниях. Распределение вероятностей нахождения атомов на том или ином расстоянии друг от друга изображено на нашем рисунке колоколообразными кривыми, «стоящими» на линиях, обозначающих нижние колебательные уровни невозбужденного и возбужденного состояний. Атомы оказываются как бы «размазанными» вокруг положения равновесия. Это приводит к тому, что и спектры поглощения и излучения тоже оказываются

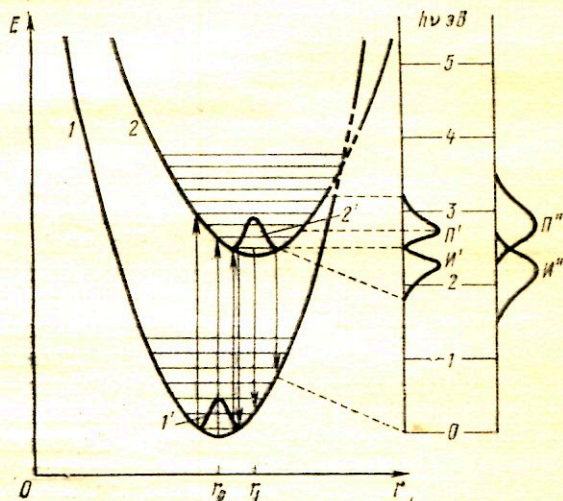


Рис. 1. Энергетическая диаграмма молекулы:

E — энергия молекулы; r — расстояние между атомами; 1 и 2 — потенциальная энергия молекулы; r_0 и r_1 — равновесные расстояния между атомами в невозбужденном и возбужденном состоянии соответственно; горизонтальные линии — колебательные энергетические уровни, Π' и $\text{И}'$ — спектры поглощения и излучения при низкой температуре, Π'' и $\text{И}''$ — те же спектры при более высокой температуре; стрелками обозначено направление переходов

* Она равна половине колебательного кванта, т. е. половине расстояния между колебательными уровнями,

«размазанными». На нашем рисунке они изображены справа от потенциальных кривых, в том же масштабе энергий.

Полосы поглощения Π' и испускания $\text{И}'$ не перекрываются друг с другом. Они соответствуют столь низким температурам, когда практически все молекулы находятся в состоянии с наименьшей колебательной энергией. В этом случае антистоксова люминесценция отсутствует, ибо тепловой добавке энергии неоткуда взяться. При более высоких температурах часть молекул оказывается на следующем колебательном уровне. На рисунке стрелки, обозначающие переходы с этих уровней, не проведены, чтобы не затемнять чертежа. Но если их мысленно провести, можно установить, что такие переходы приводят к расширению обоих спектров (кривые Π'' и $\text{И}''$) и они начинают частично перекрываться, т. е. в спектре люминесценции появляется антистоксова область.

Как видно из этого рисунка, спектры поглощения и излучения несимметричны, но один напоминает зеркальное изображение другого. На опыте это впервые было обнаружено В. Л. Левшиным. Он нашел, что у некоторых красителей такая зеркальная симметрия выполняется весьма точно, и правильно истолковал это явление как следствие подобия потенциальных кривых невозбужденного и возбужденного состояний. Позднее Б. И. Степанов нашел универсальное соотношение между спектрами поглощения и люминесценции таких систем, не зависящее от того, насколько различаются потенциальные кривые для возбужденного и невозбужденного состояний. Оказалось, что спектр испускания получается из спектра поглощения путем умножения его ординат на спектр излучения абсолютно черного тела при той температуре, при которой находится образец.

Потенциальные кривые рис. 1 позволяют объяснить еще одно свойство внутрицентральной люминесценции. В правой части рисунка (отвечающей расстояниям между атомами, большим равновесных) потенциальные кривые возбужденного и невозбужденного состояний пересекаются. Это значит, что при определенном расстоянии между атомами энергия молекулы, находящейся в невозбужденном электронном состоянии, но на очень высоком колебательном уровне, в точности равна энергии той же молекулы в возбужденном электронном

состоянии, но на более низком колебательном уровне. В таком положении атомов возможен переход молекулы из возбужденного электронного состояния в невозбужденное без изменения ее энергии. (На рисунке эта часть потенциальных кривых изображена штриховыми линиями, ибо здесь они теряют свой строгий смысл.)

Но если молекула имеет большой запас колебательной энергии, она может отдать ее окружающей среде, вовсе не испустив кванта света. Этот процесс называется внутренним тушением люминесценции. Как видно из рисунка, для внутреннего тушения необходимо, чтобы возбужденная молекула оказалась на довольно высоком колебательном уровне. Колебательная энергия, которую она должна при этом иметь, называется энергией активации тушения. Ясно, что чем выше температура, тем чаще молекула приобретает на какое-то время такую энергию и, следовательно, тем вероятнее внутреннее тушение. Поэтому при нагревании квантовая эффективность свечения таких люминофоров, начиная с некоторой температуры, резко падает. Для визуализации ультрафиолетового изображения их можно использовать лишь при более низких температурах.

Коэффициент передачи контраста изображения для слоев люминофора с внутрицентральной люминесценцией обычно равен единице, т. е. яркость свечения строго пропорциональна интенсивности возбуждения, каждая молекула не только действует независимо, но и успевает «переработать» каждый квант до прихода следующего. Инерционность люминесценции красителей, как правило, очень маленькая (характерные времена — 10^{-8} — 10^{-9} с), так что эти условия выполняются вплоть до очень высоких интенсивностей ультрафиолетового возбуждения. Одновременно малая инерционность полезна тем, что позволяет без искажений визуализировать быстроизменяющиеся изображения.

Для визуализации инфракрасного изображения запрет Стокса, напротив, является помехой, и его надо как-то обойти. Как уже отмечалось, использовать для этого тепловую энергию люминофора практически невозможно из-за быстрого снижения квантовой эффективности свечения люминофора при увеличении необходимой добавки тепловой энергии. Чтобы обойтись без этой добавки, нужно, очевидно, найти какой-то достаточно эффективный механизм сложения энергии не-

скольких элементарных возбуждений люминофора. Простейшим способом решения такой задачи представлялось использовать последовательное (или «ступенчатое») возбуждение одного и того же центра свечения несколькими квантами инфракрасного излучения (рис. 2, а). Казалось бы, что для этого необходима лишь система с промежуточными энергетическими уровнями, расстояние между которыми соответствует величинам квантов инфракрасного излучения. Именно такая схема антистоксовой люминесценции была впервые предложена Н. Бломбергом для кристаллов с трехвалентными редкоземельными ионами, имеющими целый набор узких энергетических уровней. Однако осуществить такое возбуждение, оказывается, отнюдь не просто. Действительно, коэффициенты поглощения оптического излучения и времена жизни центров свечения в возбужденном состоянии в соответствии с соотношениями А. Эйнштейна (для вероятности поглощательных и излучательных переходов) обратно пропорциональны друг другу. Поэтому если взять центр с большой вероятностью поглощения инфракрасных квантов, то он будет и испускать

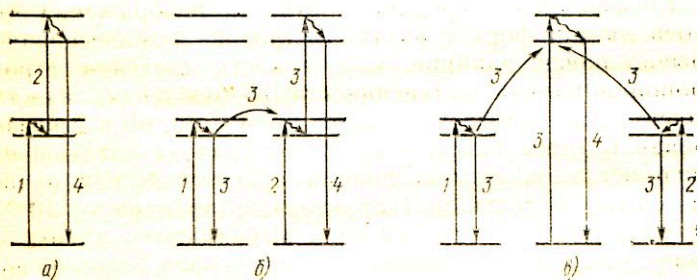


Рис. 2. Энергетические переходы при антистоксовой люминесценции:

а — при последовательном поглощении двух квантов в одном центре (схема Бломберга); б — при поглощении двух квантов в разных центрах и последующей передаче энергии от одного центра к другому (схема Озеля); в — при поглощении квантов в двух центрах одной природы и одновременной передаче ее центру другой природы (схема Овсянкина и Феофилова).

Вертикальные стрелки — переходы внутри одного центра, наклонные — перенос энергии между центрами. Номера стрелок указывают последовательность переходов. Одинаковыми номерами обозначены одновременные переходы.

их очень интенсивно и весьма быстро (за 10^{-9} с) вернется в исходное состояние. Если же, наоборот, взять центр с малой вероятностью перехода, чтобы он подольше задерживался в промежуточном возбужденном состоянии, то и поглощать инфракрасные кванты он будет слабо, т. е. будет редко переходить в возбужденное состояние. Расчет показывает, что квантовый выход такой люминесценции (т. е. отношение числа испускаемых квантов видимого света к числу поглощаемых инфракрасных квантов) составляет всего около 0,01% при падающей на образец мощности порядка 1 Вт/см^2 . Квантовая эффективность слоя будет еще меньше (ибо трудно обеспечить полное поглощение инфракрасного света), так что его яркость при умеренных плотностях возбуждения будет мала. Таким образом, данный метод используют не для визуализации изображений, а только для обнаружения инфракрасного излучения и определения его интенсивности.

КООПЕРАТИВНАЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ

Как видно из рассмотрения внутрицентральной люминесценции, главная трудность при визуализации инфракрасного изображения с помощью антистоксовой люминесценции состоит в необходимости обеспечить встречу двух возбуждений на одном центре свечения. Добиться этого очень трудно, поскольку кванты пролетают сквозь кристалл чрезвычайно быстро. Поэтому двухфотонное возбуждение и требует столь больших мощностей. Когда одно из элементарных возбуждений принимает форму возбужденного состояния центра свечения, положение улучшается именно потому, что такое состояние сохраняется значительно дольше и, следовательно, концентрация возбужденных центров может быть значительно больше концентрации квантов в падающем на образец потоке инфракрасного излучения.

Еще более эффективными для преобразования инфракрасного света в видимый оказались процессы, в которых оба элементарных возбуждения имеют форму возбужденных состояний трехзарядных ионов редкоземельных элементов, а возможность встречи двух элементарных возбуждений возникает благодаря тому, что при большой концентрации этих ионов возбужденное состояние может переходить с одного иона на другой.

Люминесценция в этом случае называется кооперативной, поскольку возбужденные ионы как бы «кооперируют свои усилия», создавая квант видимого света.

Кооперативная люминесценция была обнаружена в 1966 г. практически одновременно и независимо друг от друга П. П. Фефиловым и В. В. Овсянкиным в Советском Союзе и Ф. Озелем во Франции. Именно по такому кооперативному принципу и работают многие люминофоры, используемые для визуализации инфракрасных изображений.

Используемое в этих люминофорах явление резонансного переноса энергии от одних ионов к другим той же самой или другой природы было известно задолго до этого. Оно аналогично последовательной раскачке связанных маятников с одинаковой частотой колебаний после того, как один из них получил толчок, выводящий его из состояния покоя. Резонансный перенос в растворах и кристаллах был подробно изучен С. И. Вавиловым, Д. Декстером, Т. Ферстером, М. Д. Галанциным и другими исследователями. Однако ранее наблюдался лишь перенос энергии возбужденного центра к невозбужденному, поэтому второй центр, хотя и мог излучать в другой области спектра, но только в более длинноволновой, т. е. в соответствии с правилом Стокса. В данном же случае в переносе энергии участвует не менее двух возбужденных центров. При этом по схеме, предложенной Озелем, удвоенная энергия аккумулируется на одном из этих двух центров (см. рис. 2, б), тогда как по схеме П. П. Фефилова и В. В. Овсянкина (см. рис. 2, в) она передается третьему центру, находившемуся первоначально в невозбужденном состоянии. Оба типа процессов обнаружены на опыте, однако более эффективны люминофоры, в которых реализуется первый механизм.

Типичными примерами таких люминофоров служат различные кристаллические основы, содержащие пару ионов Yb^{3+} и Er^{3+} . В них ионы Yb^{3+} , обладающие единственным оптическим переходом в ближней инфракрасной области (0,9—1,1 мкм), используются для поглощения инфракрасных квантов, а ионы Er^{3+} — для накопления энергии и испускания квантов видимого света. При этом в зависимости от используемой кристаллической основы они излучают зеленый или красный свет. Различие в цвете объясняется тем, что у Er^{3+} есть очень много уровней, так что передача энергии возбуждения

может идти по различным каналам. В частности, после получения энергии первого кванта ион Er^{3+} может потерять наибольшую ее часть, перейдя в более устойчивое состояние с несколько меньшей энергией.

Такая потеря энергии даже весьма желательна, чтобы затруднить обратный перенос энергии. Например, если второй возбужденный уровень лежит точно вдвое выше первого, то наряду с суммированием двух возбуждений (переход на этот уровень) может произойти и обратный процесс — распад высокого возбужденного состояния на два низших, но тоже возбужденных состояния (конечно, принадлежащих двум ионам). Эффективность таких люминофоров растет пропорционально интенсивности инфракрасного света вплоть до $\sim 10 \text{ Вт/см}^2$, после чего рост постепенно прекращается. Яркость экрана пропорциональна квадрату яркости изображения. Те же люминофоры могут возбуждаться и во второй полосе поглощения (около 1,5 мкм). В этом случае процесс передачи энергии гораздо сложнее, ибо в конце концов суммируется энергия трех возбуждений, соответственно яркость свечения такого экрана пропорциональна кубу яркости изображения.

РЕКОМБИНАЦИОННАЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ

Очень большие возможности визуализации изображений открывает рекомбинационная люминесценция кристаллофосфоров. Кристаллофосфоры применяются для визуализации изображений, созданных электромагнитным излучением самых разных длин волн — от γ -лучей до радиоволн. Свойства рекомбинационной люминесценции тесно связаны с особенностями движения электронов в кристаллах. Поэтому мы с них и начнем.

В кристаллах некоторые электроны могут двигаться почти так же свободно, как они двигались бы в пустом пространстве, т. е. могут как бы «не замечать» атомов кристаллической решетки. Наиболее существенно влияние кристаллической решетки проявляется в двух отношениях.

Во-первых, оказывается, что электрон может иметь не любую энергию, как он имел бы в свободном пространстве, а лишь энергию, лежащую в некоторых разрешенных зонах, отделенных друг от друга зонами за-

прещенных энергий. Изменить свою энергию так, чтобы перейти из одной разрешенной зоны в другую, электрон может только скачком, например, при поглощении кванта света (тогда он переходит в разрешенную зону, соответствующую большим энергиям) или же при испускании кванта (тогда электрон «опускается» в зону меньших энергий).

Во-вторых, даже для разрешенных энергий имеется строго ограниченное количество состояний, в которых могут находиться электроны. Поэтому электрон может перемещаться в кристалле, лишь если в соответствующей зоне энергий занята небольшая часть возможных состояний. Если занять все состояния, то электроны, принадлежащие данной зоне, могут лишь обмениваться местами. Но если хотя бы один электрон поглотит квант света и перешел в свободную зону, то приобретает способность перемещаться по кристаллу не только он, но и «дырка», т. е. нехватка электрона в электронном облаке вблизи одного из атомов кристалла.

Действительно, если разрешенное состояние с данными координатами (а также, разумеется, и энергией) свободно, то его может занять любой ближайший электрон. Но тогда освободится место, которое занимал этот электрон, и его сможет занять следующий электрон и т. д. Механизм перемещения дырки в кристалле похож на механизм перемещения пузырька воздуха в сосуде, целиком наполненном водой. Подобно тому, как пузырек воздуха в таком сосуде не падает, а поднимается вверх, дырка движется в сторону, противоположную той, куда приложенное извне электрическое поле тянет все электроны, т. е. она ведет себя, как частица с положительным зарядом.

В кристаллофосфорах все разрешенные зоны, соответствующие малым энергиям электрона, полностью заполнены, а начиная с некоторой энергии все зоны свободны. Последняя заполненная зона, соответствующая наибольшей энергии, называется валентной зоной, так как электроны, заполняющие ее уровни, участвуют в валентных химических связях кристалла. Ближайшая к ней незаполненная зона называется зоной проводимости, ибо те немногие электроны, которые попадают на ее уровни, ответственны за электропроводность кристалла.

Атомы примеси могут иметь электроны с энергией,

лежащей где-то в пределах запрещенной для идеального кристалла зоны энергий. Разумеется, эти электроны передвигаться по кристаллу не могут, потому что атомы примеси расположены далеко друг от друга, а разрешенный энергетический уровень имеет локальный характер. Однако для «освобождения» электрона, т. е. для отрыва его от атома примеси и перехода на уровни зоны проводимости, требуется меньше энергии, чем для перехода на те же уровни из валентной зоны. Нередко для этого хватает даже энергии теплового движения. Атомы примесей могут также присоединять электроны из кристалла, оставляя в заполненной зоне дырку. Нередко для этого также бывает достаточно тепловой энергии. Захваченный таким образом электрон не может вернуться назад в валентную зону, потому что возле захватившего его атома больше нет свободного уровня, принадлежащего валентной зоне (так как «освободившаяся» при этом дырка удалась от этого атома). Как электроны, так и дырки, блуждая по кристаллу, могут встретить ионы примесей и присоединиться к ним.

При таком захвате электронов или дырок выделяется энергия, ранее затраченная на их освобождение, т. е. на отрыв от такого же атома. Если электрон и дырка встречаются на одном и том же атоме, они взаимно нейтрализуются. Этот процесс называется рекомбинацией (буквально — «воссоединение»), а атом, на котором происходит рекомбинация, — центром рекомбинации. Если часть энергии, выделяющейся при рекомбинации, превращается в квант света, то рекомбинация называется излучательной, а соответствующий центр — центром свечения. Если вся энергия превращается в тепло, рекомбинация называется безызлучательной, а центр — центром тушения.

Скорость рекомбинации пропорциональна произведению концентраций обоих рекомбинирующих партнеров, например концентраций свободных электронов и локализованных дырок или же концентраций локализованных электронов и свободных дырок. Это обстоятельство сказывается почти на всех свойствах кристаллофосфоров, но, пожалуй, сильнее всего — на ходе затухания люминесценции после прекращения возбуждения. С течением времени затухание рекомбинационной люминесценции все более замедляется, так что зависимость яркости B от времени t описывается гиперболой:

$$B = \frac{B_0}{(1+at)^\alpha} \quad (3)$$

где B_0 — начальная яркость, а a и α — постоянные (обычно α лежит между 1 и 2).

Если бы центры свечения действовали независимо друг от друга, как это имеет место при внутрицентральной люминесценции, то яркость спадала бы по простому экспоненциальному закону:

$$B = B_0 \exp(-\omega t), \quad (4)$$

где ω — полная вероятность перехода центра в невозбужденное состояние (как с излучением, так и без). Впервые это важное отличие рекомбинационного свечения от внутрицентрального было надежно установлено в 1933—1934 гг. в опытах В. В. Антонова-Романовского и В. Л. Левшина. Эти работы стимулировали интерес к подробному изучению «кристаллического свечения», как его тогда называли.

При приготовлении кристаллофосфоров в исходное вещество, называемое основой, специально вводят примеси, создающие центры свечения. Кроме того, в них вводят и другие примеси, атомы которых способны захватывать свободные электроны или дырки, а при достаточно высокой температуре — освобождать их вновь. Энергия, необходимая для этого освобождения, называется глубиной ловушек.

Для описания процессов, протекающих в таких кристаллофосфорах, часто используют так называемую зонную схему, в которой по вертикали в условном масштабе откладывают энергию электрона, а по горизонтали — координату (рис. 3). На такой схеме зоны разрешенных энергий изображаются горизонтальными полосами, локальные уровни — короткими штрихами, а переходы электронов — вертикальными стрелками. Длина стрелки условно изображает изменение энергии электрона.

Кристаллофосфоры обычно представляют собой мелкокристаллический порошок. Его крупинки, называемые зернами, имеют в поперечнике несколько микрон. Каждая такая крупинка реагирует на внешнее воздействие независимо от соседних, в то же время в результате многократных отражений света люминесценции от ее граней сама она светит практически как единое целое. Поэтому элемент изображения, возникающего на таком

экране, не может быть меньше крупинки кристаллофосфора. Как правило же, он значительно больше.

Преобразование ультрафиолетового излучения. При рекомбинационной, так же как и при внутрицентральной люминесценции, проще всего визуализировать ультрафиолетовое изображение. Для этого стремятся изготовить кристаллофосфоры, в которых было бы возможно меньше центров тушения. На рис. 3, а приведена зонная схема идеализированного кристаллофосфора, в котором нет никаких других центров, кроме центров свечения. Каждый квант ультрафиолетового света, поглощенный таким кристаллофосфором и вызвавший ионизацию центра свечения или кристаллической решетки (переходы 1 и 1' соответственно), приводит в конце концов к испусканию одного кванта света (переход 2), энергия которого меньше энергии поглощенного кванта.

Потери энергии происходят здесь из-за нескольких различных процессов. Во-первых, электрон, оторванный квантом ультрафиолетового света от центра свечения или от атома кристаллической решетки, как правило, имеет вначале энергию, превышающую энергию, соответствующую «дну» зоны проводимости, и быстро отда-

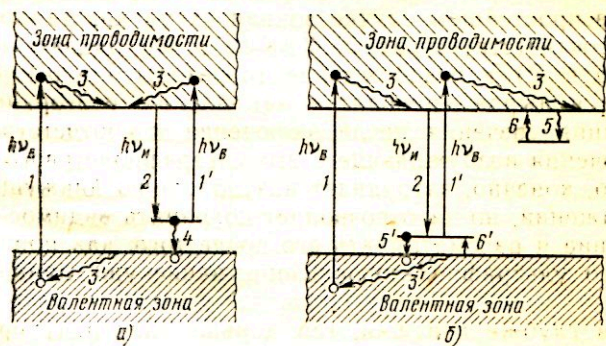


Рис. 3. Зонные схемы кристаллофосфоров:

а — только с центрами свечения; б — с центрами свечения и электронными ловушками. Черными кружками обозначены электроны, светлыми — дырки. Стрелки указывают переходы электронов (дырки совершают переходы в обратном направлении). Волнистые стрелки — безызлучательные переходы; прямые стрелки — переходы с участием излучения; $h\nu_{\text{У}}$ и $h\nu_{\text{В}}$ — энергии квантов, поглощаемых и испускаемых при этих переходах.

ет этот избыток кристаллической решетке, усиливая ее тепловые колебания (переход 3). Если электрон был оторван не от центра свечения, а от атома кристаллической решетки, то образовавшаяся при этом дырка тоже отдаст свой избыток энергии колебаниям решетки и переходит к «потолку» валентной зоны (переход 3'). При захвате дырки центром свечения она также отдает часть своей энергии колебаниям решетки (переход 4).

В момент отрыва электрона атомы, окружающие центр свечения, оказываются в неравновесном положении и, переходя в новое равновесное положение, соответствующее изменившемуся заряду центра, также усиливают колебания решетки. (Этот переход на схеме не обозначен.) Сразу после рекомбинации центр опять оказывается в неравновесном состоянии и вновь переходит к равновесию, возбуждая колебания решетки. В общей сложности эти потери могут составить треть, а то и половину энергии возбуждающего кванта. Таким образом, закон Стокса обычно выполняется и для кристаллофосфоров.

На опыте не удается получить кристаллофосфор совсем без электронных или дырочных ловушек. Поэтому даже в простейшем случае зонная схема кристаллофосфора соответствует рис. 3, б (а не 3, а). Захват (переходы 5 и 5') и освобождение (переходы 6 и 6') электронов и дырок приводят к замедлению разгорания и затухания свечения после включения и соответственно выключения возбуждающего его ультрафиолетового света. Это, конечно, затрудняет визуализацию движущихся изображений, но зато позволяет сохранять видимое изображение и рассматривать его после того, как породившее его ультрафиолетовое изображение уже давно исчезло.

Чем глубже ловушки, тем дольше электрону придется «дождаться», когда тепловые колебания случайно сконцентрируются вблизи ловушки так, что их энергии окажется достаточно для его освобождения. Поэтому свечение кристаллофосфора после прекращения возбуждения может растянуться на секунды и даже часы.

Разумеется, чем длительнее затухание (т. е. чем медленнее расходуется энергия, запасенная в кристаллофосфоре в виде потенциальной энергии разделенных зарядов), тем слабее само свечение. Например, вводя

специальные примеси, можно изготовить такие кристаллофосфоры, у которых ловушки столь глубоки, что электроны и дырки сохраняются на них более месяца после прекращения возбуждения. Видимое глазом свечение такого кристаллофосфора кончается гораздо раньше, ибо оно обусловлено электронами, освобождаемыми с более мелких ловушек, а из глубоких ловушек электроны освобождаются столь редко, что чувствительности глаза не хватает для наблюдения вызываемого ими свечения.

Однако если сделанный из такого кристаллофосфора экран нагреть до $150\text{--}200^\circ\text{C}$, то скорость теплового освобождения электронов возрастет, что приводит к росту и яркости свечения, и на экране появится светящееся изображение, соответствующее тому ультрафиолетовому изображению, которое было спроецировано на него месяц назад. Тут, правда, надо поспешить его разглядывать, ибо через несколько секунд может исчерпаться запасенная в кристаллофосфоре энергия и изображение исчезнет.

Преобразование рентгеновых и γ -лучей. При уменьшении длины волны излучения, создающего изображение, возникают две существенные особенности свечения люминофоров. Первая особенность, предсказанная С. И. Вавиловым, состоит в том, что на один поглощенный квант можно получить несколько квантов видимого света. Поглощаясь в кристалле, квант коротковолнового излучения отрывает электрон от одного из атомов кристалла и передает этому электрону свою энергию. Освобожденный электрон начинает с большей скоростью двигаться по кристаллу, но вскоре он отрывает другой электрон, передавая ему около половины оставшейся энергии. Затем каждый из этих электронов отрывает еще по одному электрону и опять «делится» с ним своей энергией*.

Таким образом, один высокоэнергетичный квант возбуждающего излучения может создать в люминофоре несколько электронно-дырочных пар, излучательная рекомбинация которых на центрах свечения приведет как бы к размножению квантов в люминофоре (рис. 4).

Энергия, затрачиваемая на рождение одной элек-

* Аналогичные процессы передачи энергии происходят и для дырок, образующихся в валентной зоне.

тронно-дырочной пары, заметно превышает наименьшую энергию, необходимую для рождения такой пары, т. е. ширину зоны запрещенных энергий E_g . Дело в том, что при создании электронно-дырочной пары должен выполняться не только закон сохранения энергии, но и закон сохранения импульса. Поэтому наименьшая энергия электрона, который еще способен создать электронно-дырочную пару, раза в полтора больше E_g . Если даже его энергию увеличить до $3E_g$, все равно такой электрон больше одной электронно-дырочной пары, как правило, создать не может, потому что оставшаяся энергия распределяется между тремя частицами.

В согласии с этими рассуждениями эксперимент показывает, что энергия, расходуемая в среднем на одну электронно-дырочную пару при возбуждении рентгеновскими лучами, γ -квантами или высокоэнергетическими заряженными частицами, например электронами, составляет $2-3 E_g$. Энергия рентгеновских и тем более γ -квантов в тысячи раз больше энергии образования пары, которая для кристаллофосфоров лежит в пределах от 8 до 20 эВ. Это значит, что один поглощенный квант рентгеновских или γ -лучей может породить тысячи квантов видимого света. Поэтому при падении на люминофор одного такого кванта получается короткая

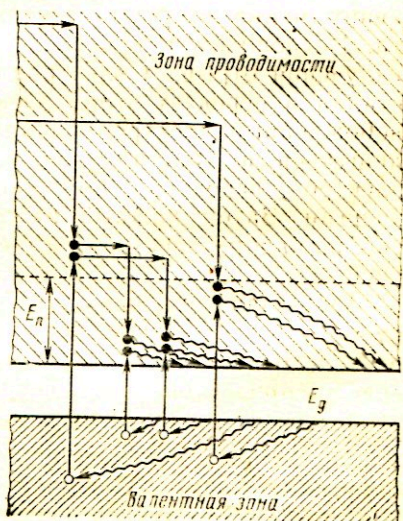


Рис. 4. Размножение электронов в зоне проводимости:

E_g — запрещенный интервал энергий; E_n — порог ударной ионизации. Стрелки указывают переходы электронов (дырки совершают переходы в обратном направлении)

вспышка — сцинтилляция, которую в некоторых случаях удается наблюдать невооруженным глазом. Дискретность вспышек в слабом потоке рентгеновских лучей служит прекрасным доказательством квантовой природы электромагнитного излучения.

Сцинтилляции как раз и обуславливают вторую особенность визуализации коротковолнового изображения. Трудно избавиться от вызванной ими зернистости изображения, особенно если приходится работать с предельно слабыми потоками излучения, что требуется, например, при просвечивании тела человека рентгеновскими лучами. Казалось бы, в этом случае надо в первую очередь стремиться использовать такие люминофоры, в которых на одну электронно-дырочную пару расходуется как можно меньше энергии — в них каждый поглощенный квант будет создавать более яркую вспышку. Но рентгеновские лучи слабо поглощаются в веществе — потому их и используют для просвечивания — и сквозь тонкий слой люминофора они могут пройти, вообще не возбуждив свечения. Поэтому лучше взять другой люминофор, в котором на создание одного видимого кванта требуется побольше энергии, но зато он сильнее поглощает рентгеновы лучи. При той же средней яркости свечения изображение на таком экране станет более равномерным, ибо оно будет состоять из более тесно расположенных светящихся точек, что удобнее для рассмотрения деталей изображения.

Для визуализации изображений, возникающих при просвечивании мягких тканей человека или его костей, сварных швов в металле или толстых металлических отливок, требуется разная «жесткость» электромагнитного излучения (т. е. разные длины волн), а это требует и разных люминофоров. В настоящее время для визуализации рентгеновых и γ -изображений используют более десятка разных люминофоров и еще более типов экранов.

Преобразование инфракрасных изображений. При рассмотрении способов визуализации ультрафиолетового изображения уже отмечалось, что для высвечивания (т. е. освобождения в виде света) энергии, первоначально запасенной в кристаллофосфоре, требуется некоторая дополнительная энергия, например энергия теплового движения. Для освобождения электронов из ловушек можно использовать и энергию квантов инфракрасного

излучения. Энергия инфракрасных квантов, освобождающих электроны из ловушек, может быть существенно меньше энергии квантов, испускаемых центром свечения после рекомбинации этих электронов. Надо только, чтобы энергия инфракрасного кванта превышала энергетическую глубину ловушки (рис. 5, а). Предел последней кладет в основном энергия теплового движения — ловушки должны быть столь глубоки, чтобы тепло освобождало электроны заметно реже, чем инфракрасный свет. Этим и ограничен порог чувствительности кристаллофосфоров, который составляет около 10^{-6} Вт/см².

Квантовая эффективность такого преобразования инфракрасного излучения в видимый свет достигает 1—2%, причем она почти постоянна при малой интенсивности инфракрасного излучения. Поэтому при малых плотностях инфракрасного излучения следует применять кристаллофосфоры с рекомбинационным механизмом свечения. При больших интенсивностях могут оказаться

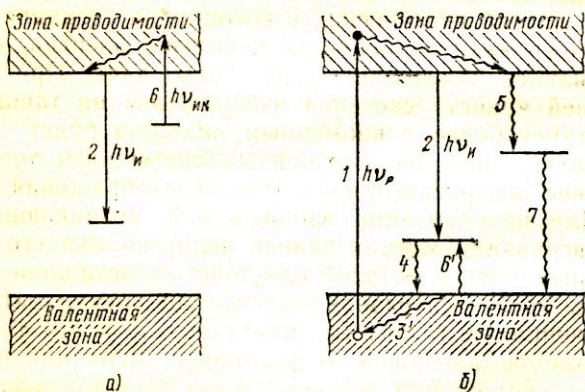


Рис. 5. Зонные схемы кристаллофосфоров, применяемых при визуализации:

а — по высвечиванию под действием инфракрасного света; б — по температурному тушению. Стрелки указывают переходы электронов (дырки совершают переходы в обратном направлении). Волнистые стрелки — безызлучательные переходы; прямые стрелки — переходы с участием излучения; $h\nu_{\text{в}}$, $h\nu_{\text{иК}}$ и $h\nu_{\text{и}}$ — энергии квантов возбуждающего высвечивающего инфракрасного и испускаемого видимого света

удобнее антистоксовы люминофоры, которые не требуют дополнительного источника возбуждения и при постоянной интенсивности инфракрасного излучения имеют постоянную яркость свечения. Кристаллофосфоры же с рекомбинационным свечением при визуализации инфракрасного излучения постепенно расходуют энергию, запасенную ранее. Поэтому яркость изображения на таких экранах постепенно уменьшается, даже если интенсивность инфракрасного излучения не меняется. В конце концов она должна стать меньше яркости тех частей экрана, на которые инфракрасное излучение не попадало, и изображение из позитивного превращается в негативное. Такое негативное видимое изображение сохраняется и после исчезновения инфракрасного изображения. Более того, сразу после выключения инфракрасного света темные места становятся еще более темными, ибо резко ослабевает освобождение тех немногих электронов, которые еще остались в глубоких ловушках.

С течением времени уменьшается не только яркость изображения, но и его контраст. Связано это с тем, что яркость рекомбинационной люминесценции пропорциональна не только концентрации свободных электронов, но и концентрации дырок на центрах свечения. Любой испущенный квант света соответствует исчезновению не только свободного электрона, но и дырки на центре свечения. Поэтому каждому следующему электрону, освобожденному из ловушки, приходится все дольше блуждать по кристаллу в поисках центра свечения, еще сохранившего локализованную дырку. Следовательно, этот электрон имеет все большую вероятность вновь попасть в ловушку, где ему опять придется «дождаться» своего освобождения. Таким образом, яркие места экрана в своем затухании как бы догоняют темные. В этом и проявляется гиперболический закон затухания, характерный для рекомбинационной люминесценции.

Некоторые кристаллофосфоры дают негативное изображение сразу, минуя позитивное. У них примеси подобраны так, что глубина центров свечения меньше глубины электронных ловушек, и потому в некотором интервале длин волн кванты инфракрасного излучения могут освобождать дырки из центров свечения, но не имеют достаточно энергии для освобождения электронов из глубоких ловушек. Поэтому они не могут вызвать

вспышки свечения, но расход запасенной энергии они все же вызывают, потому что освобожденные дырки могут рекомбинировать без излучения с электронами, локализованными на глубоких ловушках. Негативное изображение можно наблюдать после прекращения воздействия инфракрасных лучей значительно дольше, чем вспышку свечения. Но в конце концов и оно теряет свой контраст настолько, что становится трудноразличимым.

Если негативное изображение трудно разглядеть из-за уменьшения общей яркости послесвечения, хотя контраст оно еще не полностью утратило, то, осветив экран слабым равномерным ультрафиолетовым светом, можно «проявить» это изображение. Механизм этого процесса точно такой же, как уже рассмотренный механизм «проявления» полузатухающего изображения, созданного ультрафиолетовым излучением: более быстрое разгорание люминофора, еще сохранившего остатки возбуждения.

Уменьшения яркости вспышки можно избежать, если быстро перемещать люминесцентный экран. При этом инфракрасное изображение будет попадать на все новые и новые участки экрана, только что возбужденные ультрафиолетовым светом, и яркость свечения будет оставаться постоянной. Надо лишь подобрать такую скорость перемещения экрана, чтобы за время пребывания под инфракрасным излучением он не успевал заметно израсходовать запас энергии, полученный при ультрафиолетовом возбуждении. Чрезмерно быстро двигать его, конечно, тоже не рекомендуется, ибо иначе инерционность вспышки под действием инфракрасного света приведет к размазыванию изображения.

Приведем примеры люминофоров, которые можно применять для визуализации инфракрасных изображений. Позитивное изображение дает SrS—Eu , Sm . В нем центры свечения образованы европием (он дает оранжевое свечение), а глубокие ловушки — самарием. Возбуждать его можно как видимым светом, так и более коротковолновым излучением, включая и γ -лучи, а чувствителен он к ближней инфракрасной области спектра (от края видимой области до 1,5 мкм). Чисто негативное изображение дает ZnS—Cu , Ni , если его осветить излучением в области 1,3—1,5 мкм. На практике, однако, вместо него применяется другой люминофор — ZnS—Cu , Co , чувствительный в области 0,7—1,7 мкм.

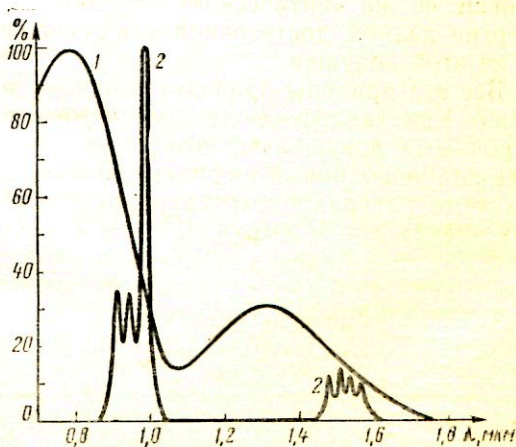
Он, правда, дает негативное изображение лишь после позитивного, но зато раз в десять более чувствителен. Центры свечения в обоих этих кристаллофосфорах образованы ионами меди, а глубокие ловушки — соответственно никелем и кобальтом. Цвет свечения этих кристаллофосфоров — зеленый, возбуждаются они лучше всего ближним ультрафиолетовым излучением ($0,35 \div \div 0,39$ мкм).

Существуют и другие кристаллофосфоры (например, $ZnS-Cu$, Pb или $ZnS-Ag, Sm$), чувствительные к инфракрасному излучению. В отличие от антистоксовых люминофоров все они имеют широкие полосы чувствительности (рис. 6). Это позволяет не беспокоиться о тщательном согласовании спектра чувствительности люминофора со спектром излучения инфракрасного источника. Однако как «вспышечные» (т. е. дающие позитивное изображение), так и тушащиеся кристаллофосфоры даже при охлаждении пригодны для визуализации излучения с длиной волны λ не более $3 \div 4$ мкм. Длина волны $\lambda = 3$ мкм соответствует энергии квантов $0,4$ эВ, что во много раз превышает среднюю энергию теплового движения даже при комнатной, не говоря уже о более низкой, температуре. Возникает вопрос, в чем же причина такого ограничения?

Во-первых, уже начиная с $\lambda = 3$ мкм, становится заметным собственное тепловое излучение предметов, на-

Рис. 6. Спормированные спектры инфракрасного возбуждения и высвечивания:

1 — зеленой полосы рекомбинационного послесвечения цинксulfидных кристаллофосфоров, активированных ионами меди и свинца, 2 — красной полосы антистоксовой люминесценции оксилхлоридных люминофоров, активированных ионами иттербия и эрбия



ходящихся при комнатной температуре. Поэтому если охладить кристаллофосфор, не защитив его специальным охлажденным экраном от теплового излучения комнаты, он может под действием этого излучения быстро потерять свой запас локализованных электронов, если эти электроны находятся в слишком мелких ловушках.

Во-вторых, чем мельче ловушки, тем, как правило, больше радиус орбиты, которую описывает электрон вокруг атома, образовавшего эту ловушку. Если орбита проходит недалеко от дырки, захваченной центром свечения, то электрон может рекомбинировать с ней, минуя зону проводимости посредством туннельного перехода. Это также приводит к ускоренному расходу запаса электронов, локализованных в мелких ловушках.

Наконец, третья причина заключается в том, что энергия кванта, необходимая для освобождения электрона из ловушки, всегда больше достаточной для этого тепловой энергии. Часть энергии поглощенного кванта расходуется не на освобождение электрона, а на возбуждение колебаний окружающих атомов, т. е. переходит в тепло, точно так же, как это происходит при ионизации центров свечения (о чем уже говорилось). При тепловом же освобождении по самой сути процесса возникновение этих колебаний означает лишь перераспределение тепловой энергии между разными типами колебаний, а вовсе не ее расход. Поэтому «тепловая» глубина ловушки может быть на несколько десятых электронвольта (для ZnS — на 0,3 и даже на 0,6 эВ) меньше ее же «оптической» глубины, т. е. наименьшей энергии кванта, достаточной для освобождения электрона из этой ловушки.

Все эти причины приводят к одному и тому же следствию. Кристаллофосфоры с мелкими электронными или дырочными ловушками, которые могли бы почувствовать длинноволновый инфракрасный свет, даже при низких температурах плохо сохраняют запас локализованных электронов и дырок. В этом и заключена физическая причина наличия длинноволновой границы чувствительности таких кристаллофосфоров.

Температурно-чувствительные кристаллофосфоры. Явление температурного тушения заключается в том, что, начиная с некоторой температуры, яркость люминесценции сильно убывает. В этом отношении люминесценция резко отличается от теплового излучения, интен-

сивность которого всегда повышается с ростом температуры, или неравновесного излучения Вавилова—Черенкова*, которое практически от нее не зависит. Недаром люминесценцию часто называют «холодным светом», подразумевая при этом, что для ее возникновения отнюдь не нужен нагрев. (В средние века бытовало представление, что свет и тепло всегда неразделимы. Наш великий соотечественник М. В. Ломоносов был одним из первых, кто опроверг это заблуждение, основываясь на своих наблюдениях полярных сияний).

Температурное тушение люминесценции во всех случаях обусловлено увеличением вероятности безызлучательных переходов, приводящих к рассеянию энергии элементарных возбуждений и превращению ее в тепловую энергию. Однако характер процессов, ответственных за развитие тушения, и их вероятность в различных люминофорах существенно различаются. Благодаря этому некоторые люминофоры способны достаточно ярко светиться даже при 1000 К (кандолюминесценция в пламени), тогда как свечение других люминофоров начинает исчезать уже при 50—100 К.

Для большинства применений люминофоров в источниках света и оптических системах отображения информации температурное тушение играет отрицательную роль, ограничивая предельную яркость и ухудшая стабильность работы таких устройств. Поэтому естественно стремление создавать люминофоры с наиболее слабым температурным тушением и обеспечивать хорошие условия теплоотвода от люминесцентного экрана. Однако тушение может стать и положительным свойством: его удастся использовать для регистрации инфракрасного излучения по его тепловому воздействию. Для этих целей нужны люминофоры, у которых в некоторой области температур (желательно вблизи комнатной) тушение развивается весьма резко. Действительно, чем сильнее падает яркость люминофора при нагревании на один градус, тем меньшее изменение его температуры можно заметить и соответственно тем меньший поток нагревающего экрана инфракрасного излучения можно обнаружить.

* Эффект Вавилова—Черенкова — видимое свечение заряженной частицы, например электрона, при движении со скоростью превышающей скорость света в данной среде.

Количественно температурную чувствительность люминофора характеризуют величиной R_T , равной отношению изменению интенсивности его свечения I , вызванному небольшим увеличением температуры ΔT :

$$R_T = \frac{\Delta I}{I \Delta T} \cdot 100\% \cdot \text{град}^{-1}, \quad (5)$$

Наибольшая температурная чувствительность внутривагетровой люминесценции при комнатной температуре составляет около $4 \div 6\%$ на градус.

Как уже говорилось, находящийся в возбужденном электронном состоянии центр свечения может вернуться в невозбужденное состояние двумя путями: с вероятностью ω_n он может испустить квант света, а с вероятностью $\omega_{б.н}$ — превратить без излучения всю свою энергию в тепло. Поэтому яркость B внутривагетровой люминесценции равна:

$$B = I_b \frac{\omega_n}{\omega_n + \omega_{б.н}}, \quad (6)$$

где I_b — интенсивность возбуждения*. Для возникновения безызлучательного перехода электрону необходима некоторая тепловая энергия ΔE , называемая энергией активации тушения. Вероятность получения такой энергии зависит от температуры по формуле, аналогичной формуле (2). Поэтому формулу (6) можно переписать в виде, в котором она называется формулой Мотта:

$$B = \frac{I_b}{1 + A \exp \left\{ -\frac{\Delta E}{kT} \right\}}, \quad (7)$$

где A — отношение вероятности безызлучательного перехода при условии, что тепловая добавка уже получена, к вероятности излучательного перехода. Как видно из формулы Мотта, наиболее резкая зависимость B от температуры T получается, когда

* Нужно помнить, что ω_n и $\omega_{б.н}$ — не «настоящие» вероятности, ибо имеют размерность s^{-1} . «Настоящие» безразмерные вероятности переходов за малый промежуток времени Δt равны произведению соответствующих размерных вероятностей на Δt . Хотя математику такое употребление термина вероятность может показаться просто ошибочным, физики настолько привыкли к нему, что давно уже употребляют его без кавычек.

$$A \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right) \gg 1 \quad (8)$$

и единицей в знаменателе (7) можно пренебречь. В этом случае температурная чувствительность равна:

$$R_T = -\frac{\Delta E}{kT^2}. \quad (9)$$

Очевидно, что чувствительность тем больше, чем больше ΔE . Однако при слишком большом ΔE экспоненциальной сомножитель в левой части неравенства (8) может оказаться столь малым, что это неравенство уже не будет выполняться. К тому же величина A не может быть сколь угодно большой. Для всех реальных случаев $A < 10^9$. Это значит, что в самом благоприятном случае $\Delta E < 0,5$ эВ и при комнатной температуре $R_T < < 6,5\%$ на градус.

Несмотря на различие физических механизмов, «математическая» причина, если можно так выразиться, ограничивающая температурную чувствительность электропроводности полупроводников, по существу, такая же, как и рассмотренная выше. Как известно, распределение электронов по энергетическим уровням полупроводника в состоянии равновесия описывается формулой Ферми:

$$n = \frac{n_0}{1 + \exp\left\{\frac{E - \mu}{kT}\right\}}, \quad (10)$$

где E — глубина рассматриваемого энергетического уровня, а μ — глубина такого уровня, называемого уровнем Ферми, который был бы заполнен ровно наполовину, если бы в кристалле была примесь, имеющая этот уровень. Величина n_0 равна концентрации соответствующей примеси, а при вычислении концентрации электронов в зоне проводимости вместо n_0 берут так называемую плотность состояний в зоне проводимости, по порядку величины, равную 10^{19} см⁻³. Формула Ферми в математическом отношении отличается от формулы Мотта лишь тем, что в ней $A=1$ и потому неравенство (4) может выполняться лишь при положительных значениях $E - \mu$. (Это отражает тот факт, что электропроводность растет с нагреванием.) Поэтому выражение

для температурной чувствительности ρ_T получается из (9) заменой $-\Delta E$ на $E-\mu$. И опять сказывается, что чем больше $E-\mu$, тем больше ρ_T , но тем меньше сама электропроводность, что и кладет предел роста ρ_T .

При рекомбинационной люминесценции от температуры зависит, и притом по-разному, скорость рекомбинации как на центрах свечения, так и на центрах тушения. Этим и обусловлена температурная зависимость ее интенсивности, которая нередко следует формуле Мотта, но, разумеется, с другими постоянными. Физический смысл этих постоянных в разных случаях оказывается различным, и потому ограничения на постоянную A здесь, вообще говоря, менее жесткие. Тем не менее далеко не каждый люминофор с рекомбинационным механизмом свечения, даже содержащий специальные примеси, образующие центры тушения, может иметь высокую температурную чувствительность.

В простейшем случае, когда центры рекомбинации быстро обмениваются зарядами с ближайшей зоной проводимости, яркость люминесценции пропорциональна интенсивности возбуждения. В этом случае распределение электронов и дырок по локальным уровням можно описать с помощью формулы Ферми, придав величине μ значения, различные для электронов и дырок. Эти значения называют квазиуровнями Ферми. В этом случае ΔE есть разность глубин энергетических уровней центров свечения и центров тушения. Она не превосходит 0,2—0,3 эВ, так что и здесь предельная температурная чувствительность примерно такая же, как чувствительность внутрицентральной люминесценции.

Значительно больший интерес с точки зрения температурной чувствительности представляют нелинейные режимы свечения, когда люминофор нельзя описать даже с помощью квазиуровней Ферми и приходится непосредственно решать достаточно сложные уравнения баланса неравновесных электронов и дырок. Качественный анализ таких уравнений, проведенный авторами брошюры и подтвержденный затем числовыми решениями исходных уравнений с применением ЭВМ, позволил четко сформулировать условия, необходимые для получения высокой температурной чувствительности рекомбинационной люминесценции. Для этого, в частности, требуется, чтобы основная часть потока рекомбинаций проходила через центры тушения, но концентрация этих

центров была много меньше концентрации центров свечения.

Каждая крупинка этих люминофоров представляет собой кристаллик твердого раствора сульфидов цинка и кадмия, взятых примерно в одинаковой пропорции.

В смесь этих порошкообразных веществ вводят в небольшом, строго дозированном количестве серебро, никель (в виде растворов солей), плавни NaCl и MgCl_2 , тщательно ее перемешивают и сушат; полученную шихту прокаливают при температуре 1100°C . В готовом люминофоре ионы серебра и никеля внедряются в регулярные узлы решетки, замещая ионы цинка, а ионы Cl^- замещают ионы серы.

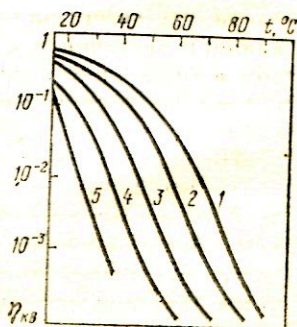
При этом серебро и хлор входят в одновалентном состоянии так, что в соответствующих местах решетки создается соответственно избыточный отрицательный и избыточный положительный заряд. Количество этих ионов почти одинаково, так что в целом люминофор электронейтрален. Ионы никеля входят в таком же, как и цинк, двухвалентном состоянии на место ионов цинка, не создавая локального заряда.

Работа вышеуказанных трех типов ионов, находящихся в различных валентных состояниях и поэтому с сильно различающимися вероятностями захвата, освобождения и рекомбинации электронов и дырок, и определяет основные свойства температурно-чувствительных люминофоров. Ионы серебра образуют центры свечения, а ионы никеля — центры тушения. Никель вводят в такой концентрации, чтобы центров тушения было в десятки или даже в сотни раз меньше центров свечения. Возбуждают эти люминофоры светом, поглощаемым всей кристаллической решеткой в той спектральной области, где ее поглощение настолько сильно, что возбуждающий свет почти целиком поглощается в слое толщиной в один кристаллик. Это необходимо, чтобы слабые потоки излучения могли вызвать заметное нагревание слоя.

Интенсивность возбуждения подбирают такой, чтобы почти все ионы никеля имели захваченные электроны, но в то же время основной поток рекомбинаций с дырками проходил через эти ионы, а не через центры свечения. Именно в этом случае получается очень неустойчивое равновесие между излучательной и безызлучательной рекомбинацией. Действительно, в таких усло-

внях электроны в зоне проводимости имеют гораздо больше шансов рекомбинировать с дырками на центрах свечения, чем попасть на центры тушения (ионы никеля), ибо там очень мало свободных мест. При повышении температуры ускоряется освобождение дырок с центров свечения, концентрация их в валентной зоне увеличивается, и они начинают более интенсивно рекомбинировать с электронами, захваченными ионами никеля. Стоит чуть-чуть нагреть люминофор, например, подышать на него, как многие никелевые центры лишатся захваченных ими электронов и будут готовы захватить новые электроны из зоны проводимости. Поэтому поток рекомбинаций перераспределится в пользу центров тушения и яркость люминесценции резко уменьшится (рис. 7). Так же влияет и уменьшение интенсивности возбуждения, только в этом случае свободные места на никелевых центрах появляются из-за уменьшения концентрации электронов в зоне проводимости. Если же, наоборот, чуть охладить люминофор или поднять интенсивность возбуждения, как никелевые центры оказываются совершенно заполненными и уже не способными захватить дополнительную порцию носителей из зоны проводимости. Таким образом, они выбывают из игры и выход свечения становится столь же высок, как если бы ионы гасителя вообще не вводились в люминофор. Эта ситуация в некотором смысле напоминает обстановку в животном мире, когда есть две подгруппы хищников — одни значительно более сильные и проворные, но их мало, а других, более слабых, значительно больше. Если пищи мало, то подавляющую часть съедают более сильные и проворные, тогда как при избытке пищи ее основная часть достается более слабой, но более много-

Рис. 7. Температурное тушение рекомбинационной люминесценции цинккадмийсульфидных кристаллофосфоров, легированных ионами серебра и никеля при различных интенсивностях возбуждения. $I_{\text{в}}$, изменяющихся от $\sim 1 \cdot 10^{-3}$ (кривая 1) до $5 \cdot 10^{-5}$ Вт/см² (кривая 5). Величина η — эффективность свечения; точками отмечены положения максимумов температурной чувствительности



численной популяции животных. Возможны и другие, например, гидродинамические аналогии. Мы не будем останавливаться на анализе уравнений, описывающих люминесценцию кристаллофосфоров. Отметим лишь, что наблюдаемая на опыте зависимость от концентраций рабочих ионов или интенсивности возбуждения для температуры, на которую приходится максимум чувствительности, хорошо описывается предложенной моделью. С этой моделью согласуется и тесная связь температурной чувствительности и зависимости квантового выхода свечения η от интенсивности возбуждения $I_{\text{в}}$. Оказалось, что

$$R_{\text{T}} = \frac{E_0}{kT^2} \cdot K_{\text{н}}, \quad (11)$$

где E_0 — глубина дырочного уровня центра свечения, а степень нелинейности

$$K_{\text{н}} = \frac{d \lg \eta}{d \lg I_{\text{в}}} \quad (12)$$

(чем больше $K_{\text{н}}$, тем более резко зависит яркость от интенсивности возбуждения).

Несмотря на такое совпадение, сами величины максимальной температурной чувствительности и степени нелинейности, измеренные при одних и тех же условиях, значительно ниже расчетных. Так, по расчету выходило, что $R_{\text{T}} = 80-90\%$ на градус и $K_{\text{н}} = 9 \div 10$, в то время как на опыте $R_{\text{T}} = 30\%$, $K_{\text{н}} = 4$.

В чем же причина столь заметного различия? Оказалось, что оно легко объяснимо, если учесть разброс параметров центров рекомбинации, который всегда имеет место в реальных люминофорах. Для этого достаточно предположить, что в разных зернах люминофора глубины центров, образованных серебром, различаются всего в пределах $0,01-0,02$ эВ при среднем значении около $0,6$ эВ; аналогичное сглаживание хода зависимостей $\eta(T)$ и $\eta(I_{\text{в}})$ будет происходить, если концентрации никеля в отдельных зернах различаются на $5 \div 10\%$. (Заметим, что сама концентрация никеля ничтожна: всего несколько атомов никеля на миллион атомов цинка. И если ее изменить на $5 \div 10\%$, то свойства люминофора существенно изменятся.)

Расчет показывает, что одновременно с уменьшением максимальной чувствительности и нелинейности расши-

ряется область температур и интенсивностей возбуждения, где эти параметры превосходят по величине половину максимального значения. Поэтому в некоторых случаях, когда нужно расширить диапазон измеряемых температур (или интенсивностей длинноволнового излучения), экран специально покрывают смесью люминофоров различного состава.

В кристаллофосфорах с несколькими сортами центров свечения температурное тушение одной полосы свечения может сопровождаться разгоранием другой полосы. Если эти полосы хорошо спектрально разделены (например, синяя и красная полосы $ZnS-Ag, Sm$), то повышение температуры приводит даже к изменению цвета свечения. Однако такие цветные люминофоры пока что менее чувствительны и на практике почти не применяются.

ОБЩИЕ ПРОБЛЕМЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Наши глаза — весьма совершенный продукт эволюции живой природы, вполне удовлетворявший жизненно важным запросам человечества на заре его цивилизации. Первые оптические приборы* — телескопы и микроскопы, позволившие изучать структуру объектов микро- и макромира, не заметную невооруженным глазом, появились лишь на рубеже XVI и XVII веков. Менее ста лет прошло с создания первых устройств, раздвинувших спектральные границы нашего зрения. Именно в XX веке впервые созданы или принципиально усовершенствованы сотни приборов, в которых самая различная информация об окружающем нас мире передается с помощью оптических изображений.

Поскольку эти приборы и устройства разрабатывали специалисты из разных областей физики, химии и техники, используя различные процессы и преследуя, казалось бы, самые различные цели, то для описания их работы исторически сложилась весьма сложная и неоднозначная терминология. Вместе с тем в настоящее

* Появление очков, исправляющих дефекты зрения (близорукость и дальнозоркость), обычно датируют XIII веком, однако их прообразом — отполированным кристаллом пользовался еще римский император Нерон (I в. н. э.).

время разработчики и исследователи стали все глубже понимать, что общая цель всех преобразователей изображения одна и та же. Она состоит в том, чтобы из первичного изображения (или сигналов, исходящих от самого объекта) на входе преобразователя получить вторичное изображение, которое должно быть не просто видимым, но настолько хорошо согласовано со свойствами человеческого глаза, чтобы можно было уверенно разглядеть интересующие нас детали в исходном изображении или предмете.

Исходное изображение может быть и не оптическим, представляя собой локальные изменения температуры, плотности потока заряженных частиц (например, электронов), невидимого электромагнитного или звукового излучения и т. д. Конечное же изображение во всех случаях адресовано человеческому глазу и должно ориентироваться на его свойства. В соответствии с этими свойствами параметры исходной картины, используемых преобразователей и получаемых с их помощью видимых изображений следует разбить на три большие группы: интенсивностные, пространственные и временные. В свою очередь, из них удобно сгруппировать три триады: «триаду начальных точек», «триаду интервалов» и «триаду подробностей».

В соответствии с ее наименованием «триада начальных точек» включает в себя минимальные значения интенсивностей внешнего сигнала, его пространственных координат или времени, при которых начинает возникать рассматриваемое нами изображение. «Триада интервалов» содержит в себе, наоборот, максимальные абсолютные (или относительные) значения тех же параметров, тогда как «триада подробностей» — это те детали изображения, которые передают интересующую нас информацию о тонкой структуре объекта исследования.

Физический смысл многих из этих понятий (табл. 1) в основном виден из самого их названия, для некоторых из них он пояснен с помощью рис. 8. Поэтому мы кратко остановимся лишь на тех из них, которые будут необходимы для дальнейшего изложения.

Одновременно мы приведем и основные параметры человеческого глаза, с которыми надо согласовывать параметры преобразователей. В качестве примера мы будем ссылаться в основном на телевидение не только

потому, что оно широко распространено, но и потому, что оно наиболее хорошо разработано и может служить примером для других систем видения в невидимых лучах, например, тепловидения, радиовидения и др. Строго говоря, исходное изображение в телевидении создается большей частью в обычном видимом свете и лишь потом оно преобразуется в электрические сигналы, которые после ряда преобразований создают видимое изображение на люминесцентном экране телевизора.

Интенсивность потоков излучения, создающих изображения, лучше всего измерять в энергетических единицах, например в ваттах на 1 см^2 . Эта величина в современной технике может изменяться в очень широких пределах: от 10^{-10} — 10^{-11} Вт/см² при ночном видении до 10^{10} Вт/см² и более при использовании мощных импульсных лазеров (правда, такая огромная мощность сохраняется очень короткое время, менее 10^{-9} с). Интенсивность солнечного света на поверхности Земли лежит примерно посередине этого интервала. В ясный полдень она несколько превосходит $0,1 \text{ Вт/см}^2$, причем около половины этой мощности приходится на видимый свет.

Глаз, как и все приемники излучения, чувствителен лишь в некоторой ограниченной области спектра. Поэтому наряду с энергетическими единицами потока не-

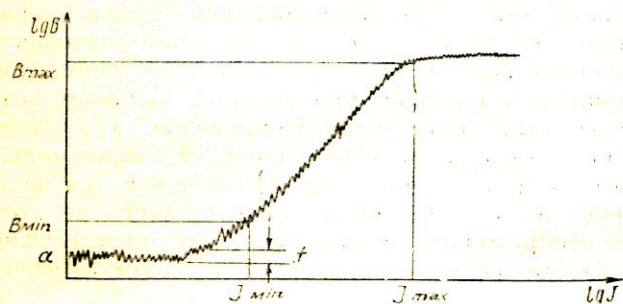


Рис. 8. Интенсивностные параметры преобразователя изображения, представленные в логарифмическом масштабе: I — интенсивность фактора, создающего изображение (например, инфракрасного излучения); B — яркость видимого изображения; α — уровень яркости фона; f — интенсивность шума; I_{\min} — значение интенсивности сигнала, вызывающее пороговый контраст изображения; I_{\max} — значение I , соответствующее динамическому диапазону преобразователя

Таблица 1

Триада	Группа	Параметры изображения	Параметры преобразователя
Триада начальных точек	Интенсивность	Интенсивность фона	Порог восприятия
	Пространство	Координаты «начала»	Координаты «начала» поля зрения
	Время	Момент появления	Момент начала записи
Триада интервалов	Интенсивность	Контраст	Динамический диапазон
	Пространство	Геометрические размеры	Размеры поля зрения
	Время	Продолжительность существования	Продолжительность работы
Триада подробностей	Интенсивность	Уровень «пространственного» шума	Пороговый контраст
	Пространство	Размер элемента разложения	Разрешающая способность
	Время	Продолжительность кадра	Продолжительность записи
		Четкость	Продолжительность хранения
		Число градаций	Продолжительность стирания
		Число кадров	

обходимо вводить и световые единицы, оцениваемые по зрительному восприятию, — люмены (лм). В области наибольшей чувствительности глаза (0,55 мкм для дневного и 0,51 мкм для сумеречного зрения) световой эквивалент 1 Вт составляет приблизительно 680 люменов. Для других длин волн световой эквивалент меньше. Коэффициент, характеризующий его уменьшение по мере удаления от максимума чувствительности глаза, называется коэффициентом видности v_λ . На границах видимой области (при 0,4 и 0,75 мкм) величина v_λ уже меньше 0,1%.

Яркость изображения B измеряют в единицах, называемых кд/м². 1 кд/м² соответствует яркости равномерно рассеивающей белой поверхности, на которую падает световой поток π люменов на 1 м².

Если исходное изображение создается в невидимом свете с помощью заряженных частиц (например, электронов, как это имеет место в телевидении) или других полей (электрических, тепловых, звуковых и т. д.), то после его преобразования в видимые изображения соответствующую яркость можно оценить по следующей простой формуле:

$$B \text{ (Кд/м}^2\text{)} = 2,2 \bar{v}_\lambda \eta_a I_p \left(\frac{\text{мкВт}}{\text{см}^2} \right). \quad (13)$$

Здесь коэффициент 2,2 соответствует «преобразователю», состоящему из белой идеально рассеивающей поверхности, на которую проектируется входное изображение в свете, соответствующем наибольшей чувствительности глаза. Он определяется принятыми единицами измерения. \bar{v}_λ — коэффициент видности, усредненный по спектру выходного изображения, η — эффективность преобразования энергии входного изображения* и I_p — интенсивность потока излучения, создающего входное изображение. Подставив сюда значения коэффициента \bar{v}_λ для белого света 0,3÷0,4 и эффективности слоя катодолюминофора $\eta_a = 0,2$, получим, что для создания обычного по яркости черно-белого изображения на экране телевизора требуется средняя плот-

* Величина η_a может и превосходить единицу, если в преобразователе используется какой-нибудь дополнительный источник энергии. Например, у электронно-оптического преобразователя η_a может быть порядка нескольких сотен.

ность электронного потока примерно 1 мВт/см^2 . Точно таким же образом можно оценить интенсивность потоков рентгеновского или инфракрасного излучения, которые необходимы для получения заданной яркости изображения.

Какие же значения яркости пригодны для наблюдения изображений невооруженным человеческим глазом? Повседневные наблюдения, дополненные специальными, в том числе весьма тонкими экспериментами, показали, что его динамический диапазон, т. е. отношение максимальных световых потоков (болевого порог) к минимальным (порог восприятия), достигает 10^{10} . После длительного (порядка часа) пребывания в темноте (темновой адаптации) человек способен заметить вспышку света длительностью $0,1 \text{ с}$, если за это время в его зрачок попало всего около 100 квантов зеленого света, что соответствует пороговой мощности $I_{\text{п}} = 3 \cdot 10^{-16} \text{ Вт}$. (Поглотится в чувствительных клетках при этом не более 10% этого потока.) Отнеся ее к площади зрачка при полном раскрытии ($0,5 \text{ см}^2$), получаем интенсивность $6 \cdot 10^{-16} \text{ Вт/см}^2$.

Естественная ночная освещенность такова, что видимая яркость предметов в миллион раз больше вышеуказанной. Возникает вопрос: почему же мы плохо видим ночью? Дело в том, что заметить не очень уверенно (а на пороге восприятия это всегда так) неизвестно откуда идущую вспышку света и разглядеть предмет — далеко не одно и то же. Ведь надо увидеть каждый его элемент, а для этого потребуется, чтобы каждый элемент послал в зрачок мощность, в несколько раз большую $I_{\text{п}}$. Но излучает он во все стороны, а не только прямо в зрачок. Расчет показывает, что если предмет находится всего в 40 см от глаза, то для того чтобы в зрачок попала пороговая мощность $I_{\text{п}}$, каждый элемент предмета должен излучать во все стороны (по закону Ламберта) $4 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}$, т. е. примерно в десять тысяч раз больше.

Однако всего один светящийся элемент, яркость которого к тому же лежит на пороге восприятия (когда вероятность его обнаружения почти равна вероятности того, что мы его не заметим), конечно, нельзя назвать изображением. Если же мы захотим увидеть по 100 элементов по горизонтали и по вертикали и чтобы интенсивность самого темного из них в 5 раз превышала по-

рог восприятия, а самый яркий был еще в 20 раз интенсивнее (такой контраст бывает на хороших фотокарточках), то потребуется поток излучения 4 мкВт, что во много раз больше потока, который может обеспечить естественная ночная освещенность. Глаз способен разрешать угловые размеры около 1 мин, что при указанном расстоянии до объекта соответствует разрешающей способности 10 штрих/мм или минимальному размеру элемента около 0,1 мм. Яркость рассматриваемой картины в таких условиях должна быть примерно 10 кд/м², т. е. близка к оптимальным условиям человеческого видения, найденным из прямых опытов.

Действительно такие опыты показали, что человеческий глаз лучше всего воспринимает изображения, яркость которых лежит в пределах от 6 до 600 кд/м². Именно в этом диапазоне он обладает наиболее высокой контрастной чувствительностью, т. е. способен воспринимать наименьшие относительные изменения яркости свечения (около 2%). А эти изменения яркости (как в пространстве, так и во времени) или контраст изображения как раз и несут интересующую нас информацию о структуре исследуемого объекта. Если бы яркость его была постоянна, то величина получаемой нами информации была бы близка к 0.

Яркость экрана телевизора 100—200 кд/м² лежит внутри вышеуказанного интервала, но не в середине, а ближе к верхнему пределу. Телепередачи рекомендуются смотреть при неполном затемнении, но вместе с тем чтобы внешняя засветка не слишком снижала контраст изображения.

Контраст изображения, нарисованного на бумаге, напротив, не зависит от освещенности («засветки»). Поэтому при чтении пользуются такими освещенностями, при которых яркость белого листа бумаги раз в десять меньше (10—20 кд/м²). К такой яркости изображения следует стремиться и при разработке любых преобразователей изображения, в которых оператор рассматривает изображение без внешней засветки.

Хотя человеческий глаз способен адаптироваться к очень различным уровням яркости — одновременно он может воспринять ее различия всего раз в 50. Поэтому если требуется визуализировать более контрастное изображение, т. е. работать в большем динамическом диапазоне I_d , то приходится уменьшать коэффициент пере-

дачи контраста $K_{п}$. Одновременно возрастает и пороговый контраст входного изображения $\Delta_{пор}$ и наоборот, за уменьшение $\Delta_{пор}$ приходится платить соответствующим уменьшением $I_{д}$. Таким образом, требование снижения порогового контраста входного изображения прямо противоположно требованию увеличения динамического диапазона, что отнюдь не всегда учитывают потребители преобразователей изображения. В довольно общем случае эти величины связаны между собой следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} I_{д} &= (I_{д.г.л})^{1/K_{п}} \\ \Delta_{пор}-1 &= (\Delta_{пор.г.л}-1)K_{п} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

где $I_{д.г.л}$ — динамический диапазон глаза при одновременном наблюдении ярких и темных мест изображения, а $\Delta_{пор.г.л}$ — его пороговый контраст. Как уже говорилось, при оптимальных яркостях изображения $I_{д.г.л} = 50$ и $\Delta_{пор.г.л}-1 = 2\%$. При удалении от оптимальных условий $I_{д.г.л}$ уменьшается, а $\Delta_{пор.г.л}-1$ во много раз возрастает. Подставив в (14) оптимальные значения $I_{д.г.л}$ и $\Delta_{пор.г.л}-1$, мы получим, что при $K_{п} = 0,5$ величина $I_{д}$ возрастает до 2500, но зато вместо двухпроцентных различий яркости элементов входного изображения удастся заметить только четырехпроцентные. Если же взять преобразователь с $K_{п} = 2$, то станут заметными даже однопроцентные различия в яркости, но динамический диапазон сузится до 7.

Наряду с пороговым контрастом зрительного восприятия при разработке преобразователей изображения необходимо учитывать наличие пространственного шума, т. е. неодинаковой яркости фона на его элементах, увеличивающего пороговый контраст для восприятия изображения. Это еще более осложняет положение. Например, возникает вопрос, в какое число раз M яркость элемента изображения должна превосходить уровень пространственного шума, чтобы этот элемент был обнаружен? Ответить на него позволяет теория вероятностей, которая дает следующую связь между M и вероятностью ошибки P :

Таблица 2

M	1	2	3	4	5	6
P	0,15	0,023	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-9}$

Поскольку в глазу имеется $\sim 10^5$ чувствительных элементов, то отсюда следует, что при $M=4\div 5$ ошибка возникнет лишь в одном из них. Если $M=3$, то ошибется уже порядка сотни элементов, но и это не так уж плохо, ибо они составят менее 1% от общего числа. Точно так же обстоит дело с определением разрешающей способности. Под независимым элементом изображения мы можем понимать элементы с такими размерами, при которых наложение сигналов от этих элементов не заметно при заданном пороговом контрасте, или же с такими, когда их взаимное влияние делает их едва различимыми, т. е. низводит контраст между ними до уровня порогового. Аналогичная ситуация возникает и при оценках временного разрешения. В специальной литературе используются оба определения. Где же здесь истина? Она как обычно бывает, где-то посередине. При выборе критерия пространственного или временного разрешения в каждом конкретном случае приходится учитывать, во что обходится наша ошибка (например, пропуск одного дефекта в материале) по сравнению с затратами на улучшение преобразователя или замену его другим, более сложным и дорогостоящим прибором.

Для оценки предельных возможностей любого преобразователя изображений весьма полезна его обобщенная характеристика — скорость переработки информации. Она измеряется количеством единиц информации, бит, которое преобразователь может за единицу времени передать с входного изображения на выходное или запомнить. Скорость переработки информации равна произведению числа кадров в секунду на информационную емкость одного кадра. Последняя равна произведению четкости изображения (т. е. числа его независимых элементов) на логарифм по основанию два от числа градаций яркости изображения*, которые можно на нем различить (т. е. от отношения наибольшего контраста изображения к его пороговому контрасту). Число же кадров в секунду есть величина, обратная его инерционности.

Для неподвижного глаза максимальный угол ясного,

* Пользуемся случаем исправить неточность, допущенную одним из авторов в работе, стоящей последней в списке, где пропущено указание, что число градаций надо прологарифмировать.

видения составляет по вертикали примерно 8° и около 10° по горизонтали, что, в частности, учтено при выборе соотношения размеров экрана телевизора ($4/5$). Разрешающая способность в центре этого поля равна 1 мин и в 2 раза уменьшается к краям, т. е. общее количество элементов разложения около 10^5 . Инерционность глаза около 0,1 с, а число градаций ~ 50 , так что максимальная скорость переработки информации равна $6 \cdot 10^6$ бит/с.

Не имеет смысла передавать глазу много большее количество информации, причем частота кадров 24 кадра/сек (время кадра $\approx 0,04$ сек) взята с избытком, чтобы избежать утомляющего глаз мелькания. Двукратный избыток числа элементов изображения по вертикали и по горизонтали учитывает подвижность глаза, позволяющую направлять в любую точку экрана центр области ясного видения, где чувствительные элементы сетчатки расположены вдвое плотнее.

Интересно сопоставить скорость восприятия зрительной информации со скоростью чтения. Даже люди, специально обученные быстрому чтению, читают всего примерно 100 знаков в секунду. Один знак алфавита (считая большие и маленькие буквы, цифры и знаки препинания) несет приблизительно 6 бит информации. Получается, что мы читаем в десять тысяч раз медленнее, чем способны воспринимать зрительную информацию. Почему же так получается? Дело в том, что во время чтения в мозгу работает сложная программа узнавания букв, слов, понятий и установления соотношений между ними.

Если максимальная скорость переработки информации преобразователем превышает скорость смены информации в исходном изображении, по какой-то параметр выходного изображения нас не устраивает, то сравнительно легко устранить этот недостаток. Поясним это некоторыми примерами. Предположим для начала, что исследуется предмет, не изменяющийся за время наблюдения. Если его размеры больше поля зрения преобразователя, то можно рассматривать этот предмет по частям, смещая время от времени координаты «начала» поля зрения. (Именно это и делает в данный момент читатель, перемещая взгляд по строкам этой страницы).

Если узок динамический диапазон преобразователя,

то можно поступить принципиально таким же образом, смещая на этот раз не координату «начала» поля зрения, а порог восприятия преобразователя. Наконец, если недостаточна разрешающая способность, нужно увеличить коэффициент передачи контраста. Хотя это и не повысит предельную разрешающую способность преобразователя, но поможет использовать ее целиком, так как на практике разрешающая способность часто ограничивается не уровнем пространственного шума изображения, а пороговым контрастом наблюдателя. Необходимо, однако, иметь в виду, что увеличение коэффициента передачи контраста обычно сопровождается уменьшением динамического диапазона, так что предельный контраст выходного изображения при этом останется прежним.

Если за время наблюдения предмет успеваеt измениться, т. е. в нем возникает новая полезная информация, то скорость переработки информации преобразователем должна быть не меньше скорости рождения полезной информации в предмете. Но даже если эти параметры и согласованы, остается еще скорость переработки информации наблюдателем, которая может заметно от них отличаться и изменить которую мы не можем. Если она хоть немного меньше скорости рождения интересующей нас информации, то приходится изменять масштаб времени. Это достигается запоминанием промежуточных изображений и последующей демонстрацией их наблюдателю с увеличенной продолжительностью кадра как поступают, например, при ускоренной киносъемке быстропротекающих процессов.

При разработке преобразователей изображения необходимо иметь в виду, что все его параметры взаимно связаны и их нельзя считать строго постоянными.

В частности, для люминесцентных экранов улучшение инерционности и разрешающей способности, как правило, сопровождается понижением их чувствительности к регистрируемым излучениям, что имеет простое объяснение, связанное с физикой соответствующих процессов.

Поэтому при разработке преобразователя изображения бессмысленно пытаться улучшить все его параметры одновременно, действуя по принципу «каши маслом не испортишь». Тут больше подходит другая поговорка: «За двумя зайцами погонишься (а тут их даже больше,

чем два), ни одного не поймаешь». В каждом случае приходится четко уяснять, для решения какой задачи предназначен разрабатываемый преобразователь. Каждый раз нужно заново решать вопрос, что, например, опаснее пропустить, дефект в материале или принять за дефект случайный разброс яркости, не разглядеть какие-то детали в самых светлых или самых темных местах изображения либо вообще не заметить объект, малоотличающийся по своей яркости от окружающего его пространства. Только решив эти вопросы, можно установить, какой именно параметр преобразователя следует стремиться улучшить, отдавая себе отчет, что при этом почти неизбежно ухудшение других его параметров.

В заключение этого раздела отметим, что в последние десятилетия интенсивно развивается математическая теория количественной обработки оптических изображений, позволяющая значительно повысить их качество и надежность. В частности, именно таким образом удалось существенно улучшить качество фотоснимков поверхности Луны и Марса (полученных со спутников), разглядеть такие детали их структуры, которые в исходных снимках были практически не заметны. Эти успехи связаны в основном с цифровым кодированием изображений, применением ЭВМ и разработкой новых методов фильтрации изображений, избавляющих их от различного рода случайных помех. Простейшим аналогом этой фильтрации может служить работа звуковых фильтров для отрезания наиболее высоких и наиболее низких частот колебаний, которые уже давно используются при записи и воспроизведении человеческой речи или музыки, а также при реставрации этих записей. Как известно, их принцип действия основан на разложении звуковых сигналов в ряды Фурье, которые применимы и для анализа оптических изображений. Реализация аналогичных, но более сложных методов реставрации оптических изображений должна дать значительный эффект для ряда областей естествознания и техники.

ПРОСВЕЧИВАНИЕ РЕНТГЕНОВСКИМИ ЛУЧАМИ

Люминесцентная визуализация рентгеновских изображений участков человеческого тела, а именно кистей

рук была осуществлена еще самим Рентгеном — первооткрывателем рентгеновских лучей. Исторически это был первый случай видения в невидимом свете, давший начало первому широкому применению явления люминесценции. В настоящее время рентгеновскими кабинетами оснащены практически все лечебные учреждения нашей страны. Большие диагностические возможности рентгеновского просвечивания обусловлены не просто хорошим проникновением этих лучей через ткани человеческого тела, а также и тем, что они все же несколько поглощаются в них, причем в разных тканях по-разному. Подобрав длину волны рентгеновского излучения, можно получить теневое изображение тех или иных органов.

Различают три основных вида рентгеновского просвечивания. Во-первых, это рентгеноскопия, т. е. непосредственный визуальный просмотр изображений на люминесцентном экране. Во-вторых, это рентгенография, при которой осуществляется проекционная съемка видимых изображений на малоформатную фотопленку. И наконец, флюорография, т. е. контактная съемка на фотопленку в натуральную величину, при которой люминесцентный экран используют лишь для усиления изображения.

Каждый из этих методов обладает определенными преимуществами и недостатками и требует разработки особых люминофоров. Так, при рентгеноскопии спектр свечения должен быть согласован со спектром чувствительности глаза, тогда как при двух других методах требуется его согласование со спектром чувствительности фотопленок. Поэтому в первом случае предпочтительнее люминофоры с зеленым цветом свечения (например, ZnS , $CdS-Ag$), а в двух других — с синим (например, $CaWO_4$).

Выше мы уже говорили, что естественное стремление снизить дозы рентгеновского излучения приводит к низким уровням яркости изображения, когда проявляется его квантовая зернистость. Расчет показывает*, что на площадку $0,1 \times 0,1$ мм², соответствующую разре-

* При расчете было принято, что яркость экрана равна $0,05$ кД/м², энергетический выход его рентгенолюминесценции равен 20% и энергия рентгеновских квантов 20 КэВ.

зависимости способности глаза, за время 0,1 с (что соответствует инерционности зрительного восприятия) падает в среднем всего порядка сотни рентгеновских квантов. Число квантов, упавшее на эту площадку за какой-то определенный промежуток времени, не в точности равно средней величине, а может случайным образом отклоняться от нее в ту или другую сторону. Средняя величина этих отклонений приблизительно равна \sqrt{N} , где N — среднее число падающих квантов. Так, например, при $N=100$ отклонение от среднего $\Delta N=10$. При этом различие яркостей отдельных элементов изображения в каждый момент времени может достигать 20%, что и воспринимается как зернистость изображения.

Интересно, что впервые квантовые флуктуации потока электромагнитного излучения были обнаружены не в рентгеновской, а в видимой области спектра. Их наблюдал С. И. Вавилов в очень тонких экспериментах по определению абсолютной чувствительности сетчатки глаза.

Зернистость рентгеновского изображения становится еще более явной, если снижать мощность облучения, используя электронно-оптические усилители изображений, как это начинают делать на практике. Электронно-оптические усилители имеют фотокатод и люминесцентный экран, между которыми приложена разность потенциалов до 20 кВ. Фотоэлектроны, выбиваемые квантами света с фотокатода, ускоряются в электрическом поле и создают на люминесцентном экране электронное изображение, которое преобразуется в видимое аналогично телевизионному изображению. (Отличие от телевизора в том, что в данном случае нет развертки луча и все изображение проектируется одновременно.)

Поскольку энергия каждого электрона примерно в 10 тыс. раз больше энергии квантов видимого света, яркость изображения может быть во много раз больше исходной. Таким образом, яркость удается поднять до такой величины, что условия наблюдения становятся оптимальными по контрастной чувствительности к пространственному разрешению. Его удается даже передать на экран телевизора, что создает не только комфорт медицинскому персоналу, но и позволяет осуществлять дополнительную подстройку четкости изображения, выявляя интересные детали. Однако квантовые флуктуации изображения при этом отнюдь не исчеза-

ют и дозу облучения удается убавить не более чем раз в десять. Основная польза от применения электронно-оптических усилителей изображения состоит в лучшем согласовании параметров получаемого изображения со свойствами человеческого глаза, что значительно уменьшает вероятность ошибки в диагнозе.

В последние годы в медицине и биологии все шире начинают использовать просвечивание живых организмов ультрафиолетовым излучением, вводя в них небольшие количества люминесцирующих растворов красителей. В частности, по таким изображениям часто непосредственно во время операции удается достаточно точно определить границы поражения различных органов и соответственно осуществить более деликатное хирургическое вмешательство.

При просвечивании неживых объектов, например сварных швов, металлических отливок и т. п., нередко приходится пользоваться более коротковолновым излучением, включая и γ -лучи, потому что оно лучше проходит сквозь металл. Здесь так же желательно снижение дозы, но, конечно, не для «пациента», а для оператора, потому что от проникающего излучения очень трудно защититься. Так как более коротковолновый квант несет больше энергии, то для создания той же яркости экрана их требуется меньше и неприятности с квантовой зернистостью изображения здесь проявляются не менее остро.

Имеются, однако, другие важные для практики задачи, в которых рентгеновское излучение является, наоборот, нежелательным фоном. В частности, при юстировке ускорителей необходимо установить структуру пучка ускоряемых частиц на фоне возбуждаемого ими рентгеновского излучения. Для этого применяются нелинейные кристаллофосфоры (например, ZnS , CdS ; Ag , Ni), усиливающие контраст изображения. Этот эффект обусловлен тем, что поглощение веществом энергии электронов значительно сильнее, чем для рентгеновских лучей; в соответствующее число раз различается и объемная плотность возбуждения при одинаковой энергетической интенсивности этих потоков. Аналогичный принцип избирательной дозиметрии используется для регистрации α -частиц и даже ультрахолодных нейтронов на интенсивном фоне рентгеновских лучей.

НОЧНОЕ И ИНФРАКРАСНОЕ ВИДЕНИЕ

Освещенность поверхности Земли даже в наиболее светлую лунную ночь в $300 \div 400$ тысяч раз меньше, чем в ясный солнечный день; в отсутствие Луны эта освещенность понижается еще в тысячу раз. Соответствующая плотность потока видимого света, отражаемого окружающими нас предметами, лежит в пределах $10^{-10} - 10^{-11}$ Вт/см², так что человеческий глаз с трудом различает даже близко расположенные предметы. Интерес к ночному видению, особенно на больших расстояниях, сильно возрос в годы второй мировой войны в связи с необходимостью проведения боевых действий в ночное время. Во многих странах были созданы различные приборы и устройства, в том числе с применением люминесцентных экранов, чувствительных к инфракрасным лучам (метаскопы и снуперскопы, выпущавшиеся соответственно Германией и США).

В послевоенные годы за рубежом наибольшее распространение получили бинокли, телескопы и прицелы, основанные на применении уже упоминавшихся выше электронно-оптических преобразователей. Так же как и при рентгеновском просвечивании, эти преобразователи в тысячи раз увеличивают яркость изображения, доводя ее до десятых долей канделы на 1 м² при разрешении $40 \div 50$ штрихов на 1 мм. Применение в преобразователях фотокатодов, чувствительных вплоть до $1,1 \div 1,2$ мкм, позволяет не только увеличить используемый поток, но и получать дополнительную информацию об окружающих нас предметах. Так как рассеяние света обратно пропорционально четвертой степени длины волны, то инфракрасное излучение гораздо лучше проходит сквозь туман и дым, чем видимое. Этим обусловлены преимущества инфракрасной аэрофотосъемки местности над обычной, хотя чувствительность фотопленок к инфракрасным лучам ниже, чем к видимому свету. Примечательно, что ряд деталей ландшафта, незаметных при дневном освещении, становится видимым в инфракрасных лучах. Так, листья свежесрезанных растений значительно быстрее «темнеют» в инфракрасном свете, чем в видимом.

Подсвечивание или просвечивание инфракрасными лучами используют также в криминалистике и в живописи для установления подлинности документов и ста-

ринных картин, обнаружения в них более поздних надписей и изображений. Помогает такое просвечивание и при реставрационных работах, причем в некоторых случаях для этих целей использовали люминофоры, чувствительные к инфракрасным лучам. В настоящее время инфракрасное видение применяют в медицине, биологии и даже сельском хозяйстве для обнаружения невидимых в видимом свете дефектов, возникающих при различных заболеваниях живых организмов. Вместе с тем современные применения вспышечных и тушащихся кристаллофосфоров, а также антистоксовых люминофоров связаны прежде всего с развитием квантовой электроники.

Люминесцентные экраны оказались весьма удобными для изучения пространственно-временных и спектральных характеристик твердотельных, газовых, а также полупроводниковых лазеров при их разработке и исследованиях. В отличие от электронно-оптических преобразователей такие экраны не требуют применения высокого напряжения, значительно менее чувствительны к электрическим помехам и, наконец, несоизмеримо дешевле. Они позволяют получать изображения в реальном масштабе времени или в случае запоминающих экранов сохранять это изображение без всяких вспомогательных операций (типа проявления фотопленок), допуская многократное использование одного и того же экрана. Чувствительность люминесцентных экранов вполне достаточна для работы с лазерными источниками, средняя мощность излучения которых в постоянном или квазинпульсном режиме обычно измеряется милливаттами или даже ваттами.

Наиболее высокой чувствительностью обладают вспышечные люминофоры, однако по мере их высвечивания инфракрасными лучами яркость вспышек падает что затрудняет их применение особенно при работе с интенсивными лазерными источниками. В связи с этим сотрудниками ФИАН создан новый прибор «инфравизор», позволяющий получать на экранах из вспышечных люминофоров очень яркие (до 100 Кд/м^2) и высококонтрастные (контраст более 100) изображения полей излучения инфракрасных лазеров. Для этого оказалось достаточным сделать вращающийся цилиндрический экран, который с одной стороны все время возбуждается небольшой ультрафиолетовой лампочкой, а с противоположной стороны на него проектируется визуализируе-

мое инфракрасное изображение. Подбирая скорость вращения этого экрана в зависимости как от используемого люминофора, так и от интенсивности инфракрасных лучей удастся получить почти линейную зависимость яркости изображения от плотности инфракрасного излучения от 10^{-6} до 10^{-2} Вт/см² с соответствующей яркостью от сотых долей до сотен кандел на 1 м². Рабочая область длин волн экрана — 0,7—1,7 мкм, разрешающая способность — не хуже 5 штрихов на 1 мм, а инерционность — не более 0,1 с. Благодаря применению светофильтров изображение можно получать в незатемненном помещении даже вблизи порога регистрации. Этот прибор использовался, например, для получения увеличенного более чем в 100 раз видимого изображения излучающей поверхности полупроводниковых лазеров на GaAs ($\lambda=0,91$ мкм). Такие изображения позволяют надежно обнаруживать дефекты изготовления *p-n*-переходов и контролировать последующую их деградацию, приводящую к уменьшению размеров излучающей поверхности.

Чувствительность антистоксовых люминофоров к инфракрасным лучам при указанных выше плотностях излучения значительно ниже, чем у вспышечных люминофоров. При их разработке предполагалось, что основная область их применения — это буквенно-цифровые индикаторы, используемые для панелей приборов и мини-ЭВМ. Действительно, антистоксовы люминофоры, нанесенные на GaAs—Si диоды, излучающие в ближней инфракрасной области, позволили создать новый тип светодиодов с красным, зеленым и даже голубым цветом свечения. Такие светодиоды вполне могут конкурировать со светодиодами на основе гораздо более дефицитных и дорогих кристаллов широкозонных полупроводников. Однако в настоящее время для этих целей обычно применяют низковольтные катодолюминофоры, порошкообразные электролюминофоры, газоразрядные лампочки или жидкие кристаллы, рассмотрение которых увело бы слишком далеко в сторону.

Одновременно наметилось другое интересное применение антистоксовых люминофоров (в сочетании с некоторыми инфракрасными лазерами). Недавно группой сотрудников ФИАН под руководством Г. Г. Петраша создан новый тип микроскопов для изучения микроструктуры объектов (например, биологических), не вы-

держивающих больших лучевых нагрузок. Особенность этих приборов, получивших название проекционных лазерных микроскопов, состоит в большом (до 10^4 раз) усилении яркости изображения, проектируемого на экраны больших размеров. Источником и усилителем света в таком микроскопе служит трубка с парами металлов, столь сильно возбужденных электрическим разрядом, что в них возникает инверсная заселенность некоторых энергетических уровней, соответствующих оптическому переходу. Свет, вышедший из этой трубки, попадает через объектив на исследуемый предмет, рассеивается им и частично входит обратно в объектив и далее в трубку, где он усиливается и затем, выйдя из нее с другой стороны, попадает на экран, где и создает изображение.

Усиление происходит благодаря тому, что свет, кванты которого соответствуют по энергии расстоянию между двумя уровнями, верхний из которых заселен больше, чем нижний, проходит сквозь такую среду, не только не поглощаясь, но даже усиливаясь. При этом он не меняет своего направления, так что изображение создается точно так же, как и без усиления. Если трубка наполнена парами меди, то изображение получается сразу в видимом зеленом свете (0,53 мкм), при использовании паров Ва оно получается в инфракрасных (1,5 мкм), а паров золота — ультрафиолетовых (0,314 мкм) лучах. Оно может быть преобразовано в видимое при использовании соответствующих люминесцентных экранов. Длина волны инфракрасного излучения хорошо соответствует длинноволновой полосе чувствительности антистоксовых люминофоров, а его интенсивность (до 10 Вт) позволяет получать эффективность преобразования до 1% (при площади изображения 1 см^2).

Не менее важно и то обстоятельство, что данное излучение лежит уже за границей чувствительности электронно-оптических преобразователей, но вместе с тем соответствует прозрачности таких распространенных полупроводников, как Ge и Si, из которых изготавливаются интегральные схемы и другие элементы микроэлектроники. Поэтому антистоксовы люминофоры, не требующие дополнительного оборудования, могут успешно применяться для изучения внутренней структуры этих объектов. Существенно и то, что благодаря почти куби-

ческой зависимости яркости свечения от плотности, возбуждения антистоксовы люминофоры позволяют повысить контраст изображения. Однако из-за той же нелинейности, если требуется получить изображение больших размеров, то в проекционном микроскопе целесообразно использовать вспышечные или тушащие люминофоры, более эффективные при малой плотности регистрируемого излучения.

ОТ ТЕПЛОВИДЕНИЯ К РАДИОВИДЕНИЮ

Термин «теповидение», смысл которого передается двумя составными частями этого слова, не столь уж однозначен. Действительно, понимая его буквально («наблюдение предметов по их собственному тепловому излучению»), тепловидением можно было бы назвать наблюдение диска Солнца, нити лампочки накаливания и других раскаленных тел, которые видны невооруженным глазом. Однако под тепловидением обычно подразумевают получение видимых изображений лишь очень слабо нагретых предметов, излучение которых лежит далеко за длинноволновой границей чувствительности как нашего зрения, так и большинства фотоприемников.

Связь длины волны λ , соответствующей максимуму теплового излучения, с абсолютной температурой T определяется известным законом Вина: $\lambda = 2898/T$. Поэтому большинство окружающих нас предметов с температурой около 300 К излучает вблизи 10 мкм. Понятие «теповидение» связано в основном с регистрацией излучения в этой спектральной области, которая требует применения соответствующих приемников излучения, работающих обычно по тепловому принципу.

Первым прибором, позволившим получать видимые изображения слабонагретых тел, стал эвапорограф Черни, предложенный в 1929 г. На его приемный экран нанесена масляная пленка, которая нагревается и частично испаряется в местах воздействия проецируемого на нее теплового изображения предметов. Изменение толщины этой пленки вызывает изменение ее прозрачности по отношению к видимому свету и позволяет непосредственно глазом увидеть тепловое изображение предметов, например человеческого тела. Чувствительность современных эвапорографов достаточно высока ($\Delta T \approx 0,2^\circ$), однако их большая инерционность (до минуты

между циклами испарения и повторного образования пленок) затрудняет их применение.

Поэтому для целей тепловидения в настоящее время обычно применяют значительно более сложные системы с использованием охлаждаемых фотоприемников на основе InSb , на которые последовательно проектируются отдельные элементы изображения. Далее полученные электрические сигналы усиливаются и визуализируются на обычном телевизионном экране. Спектр чувствительности этих приборов даже при охлаждении до температуры жидкого азота доходит только до $5\div 6$ мкм. Однако благодаря высокой чувствительности электронной аппаратуры они позволяют получать на экране небольших телевизоров достаточно хорошее изображение с разрешением по температуре до $0,1\div 0,2^\circ$. Частота кадров при этом составляет $10\text{--}20\text{ с}^{-1}$. По такому принципу работают тепловизоры, выпускаемые фирмой AGA, а также советские тепловизоры «Алмаз», «Радуга» и др. Эти приборы весьма перспективны для медицинской диагностики раковых опухолей или тромбов в кровеносных сосудах, приводящих к местному повышению или соответственно понижению температуры тела на $2\text{--}3^\circ$.

Значительно проще для тепловидения было бы использовать люминесцентные экраны с температурно-чувствительными люминофорами. Такое предложение впервые выдвинул в 1950 г. Ф. Урбах, который продемонстрировал возможность получения видимых изображений нагретых насосов и даже силуэта руки человека с помощью кристаллофосфоров $\text{ZnSCdS}:\text{Ag}, \text{Ni}$. Однако несмотря на дальнейшее повышение температурной чувствительности кристаллофосфоров при проекционном тепловидении они не позволяют различать перепады температур менее 10° , т. е. сильно уступают тепловизорам. Поэтому в настоящее время они используются только для контактного тепловидения, когда тонкие слои люминофора непосредственно наносят на поверхность слабо нагретых тел. Таким способом удобно визуально контролировать местный нагрев различных элементов электронных схем во время их работы. При этом изменяя интенсивность ультрафиолетовой подсветки, удается перекрыть диапазон температур около 100°C с непосредственным визуальным разрешением до температуры не хуже $1\div 2^\circ\text{C}$ и в 10 раз лучше при использовании фотоприемников.

Другое возможное применение таких люминофоров — определение изменений температуры биологических объектов. Так, они позволяют контролировать с точностью до $0,2^{\circ}\text{C}$ нагрев растворов биополимеров и клеточных суспензий сверхвысокочастотным излучением, причем отсутствие поглощения этого излучения в люминофоре делает его применение предпочтительным по сравнению с другими датчиками температуры.

Несмотря на прозрачность люминофоров в дальней инфракрасной, а тем более СВЧ-области длин волн, они успешно используются для регистрации полей излучения во всем этом спектральном диапазоне. Для этого люминесцентные экраны снабжают дополнительным слоем, поглощающим регистрируемое излучение и передающим выделяющееся при этом тепло зернам люминофора.

Именно на таком принципе основана работа экрана радиовизора, который был создан в 70-х гг. в Физическом институте им. П. Н. Лебедева АН СССР. Его основная часть — трехслойный люминесцентный экран. Он состоит из тонкой лавсановой пленки (2—3 мкм), плотно натянутой между двумя металлическими кольцами, на которую в вакууме напылен очень тонкий слой алюминия ($5\div 100 \text{ \AA}$). Затем на металлизированную пленку из суспензии осаждаются зерна люминофора (с плотностью нанесения не более $2\text{—}3 \text{ мг/см}^2$). Приготовление тонких слоев необходимо для уменьшения теплоемкости и теплопроводности экранов, определяющих порог их чувствительности, а также пространственную и временную разрешающую способность. Очень маленькая толщина слоя металла (меньше длины свободного пробега электронов и толщины скин-слоя) обеспечивает практически одинаковое поглощение (до 50%) регистрируемого излучения, начиная от ближней инфракрасной области вплоть до радиоволн. При этом максимальная длина волны ограничена только размером рабочей поверхности экранов, диаметр которых в настоящее время превышает 10 см.

Для увеличения рабочих размеров экрана нужно преодолеть не только чисто технологические трудности, но и добиться однородности ультрафиолетового возбуждения его поверхности. Для этого в усовершенствованных конструкциях радиовизора используют кольцевые люминесцентные лампы с люминофором, преобразую-

щим коротковолновое ультрафиолетовое излучение в более длинноволновое, хорошо поглощающееся в люминофоре. Изменение интенсивности возбуждения, осуществляемое диафрагмой, позволяет изменять температурную чувствительность люминофора и соответственно регистрировать плотность излучения от нескольких милливатт до десятых долей ватта на 1 см^2 .

Пороговая плотность излучения для таких экранов составляет около 1 мВт/см^2 на воздухе и примерно в 2 раза ниже при помещении их в вакуумированную кассету, т. е. при исключении конвенционного теплообмена. Пространственное разрешение достигает 4—5 штрихов на миллиметр (если позволяет длина волны излучения), а время сохранения изображения составляет несколько десятых долей секунды. Изменяя конструкцию экрана, можно добиться увеличения их пространственного и временного разрешения, а также максимальной регистрируемой плотности излучения (до десятков ватт на 1 см^2). Однако при этом повышается порог чувствительности, так что динамический диапазон регистрируемых излучений не превышает 50.

Наименьший порог чувствительности радиовизора $I_{\text{пор}}$ задается формулой:

$$I_{\text{пор}} = \left(\frac{\Delta J}{J} \right)_{\text{пор}} \frac{8\sigma T^3 \xi_{\text{т}}}{R_{\text{т}} \xi_{\text{р}}}, \quad (15)$$

где $\left(\frac{\Delta J}{J} \right)_{\text{пор}}$ — наименьший контраст, различаемый глазом, $R_{\text{т}}$ — температурная чувствительность, $8\sigma T^3$ — изменение теплового излучения экрана при нагревании его на 1° , которое было бы, если бы он был абсолютно черным, $\xi_{\text{т}}$ — степень его черноты для теплового излучения, а $\xi_{\text{р}}$ — для регистрируемого излучения (Уверенно работать можно, разумеется, лишь при мощностях регистрируемого излучения, обеспечивающих контраст $\frac{\Delta J}{J}$, по

крайней мере раза в два превосходящий пороговый.) На опыте получается, что $I_{\text{пор}}$ в 2—3 раза больше теоретического предела. Причины этого ясны: пространственный шум, т. е. непостоянство яркости по поверхности экрана и недостаточная яркость экрана, из-за которой глаз работает в неоптимальном режиме.

В СВЧ-области с помощью радиовизора удается легко выполнять такие же операции, какие в видимом диа-

лазоне делают при наблюдении просто глазами: изготавливать различные квазиоптические тракты, измерять направленность излучения рупоров (рис. 9) для выбора их оптимальной формы, контролировать качество линз (изготавливаемых из тефлона) и т. д.

Интересно, что радиовизор может работать по двухлучевой схеме, визуализируя интерференционную картину, которая позволяет установить пространственное распределение не только амплитуды, но и фазы излучения. Вводя в одно из плеч такого интерферометра объекты, полностью прозрачные для СВЧ-излучения, но дающие изменение фазы излучения, мы можем контролировать их внутреннюю структуру. Таким образом удастся разглядеть, что расположено внутри предметов, совершенно не прозрачных в видимом и даже инфракрасном свете, например, изучать внутреннее строение различных образцов горных пород, не разрушая эти образцы. Другое интересное применение таких люминофоров в СВЧ-области связано с контролем полей излучения внутри резонаторов. Для этого надо заменить стенку интересующего нас резонатора экраном радиовизора, расположенным люминофорным слоем наружу. Чтобы не слишком ухудшать добротность резонатора, слой алюминия следует в этом экране сделать потолще для увеличения

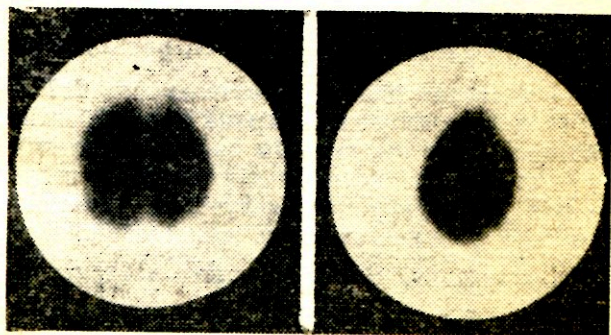


Рис. 9. Структура поля излучения волноводного рупора сверхвысокочастотного излучения ($\lambda=2,3$ мм), полученная с помощью радиовизора:

а — при двухлепестковой диаграмме направленности; б — при однолепестковой диаграмме направленности, полученной для того же рупора, укороченного в 2 раза

его электропроводности. Такой способ позволяет просто наблюдать изменения в распределении электромагнитного поля, происходящие при настройке резонатора или при внесении в него каких-либо предметов. Важно, что сам люминофор расположен вне резонатора и не вносит (в отличие от других датчиков) никаких искажений в структуру исследуемого поля. Эти новые методы успешно развиваются в ФИАН под руководством Н. А. Ирисовой.

Не менее важно и применение радиовизора для контроля полей излучения CO_2 -лазеров. Высокая мощность излучения этих лазеров (до десятков ватт и более) делает нецелесообразным применение гораздо более сложных и дорогих тепловизоров, которые к тому же с трудом выдерживают такие лучевые нагрузки. Экран же радиовизора вполне может их выдержать, причем так как здесь не требуется большой чувствительности, можно увеличить плотность ультрафиолетового возбуждения и довести яркость изображения до десятков нит, что очень облегчает его наблюдение. Хотя изображение сохраняется доли секунды, радиовизор позволяет регистрировать очень короткие (до 10^{-8} с) одиночные импульсы излучения. Это невозможно для тепловизоров и других приборов с разверткой изображения.

Люминесцентные экраны в сочетании с CO_2 лазерами позволяют осуществлять дефектоскопию полупроводниковых материалов, не прозрачных в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне. Для просвечивания промышленных материалов сотрудники ФИАН и Гиредмета создали дефектограф «Экран-11». В этом приборе увеличенное инфракрасное изображение просвечиваемого образца визуализируется с помощью радиовизора, затем усиливается электронно-оптическим преобразователем и с него передается на экран телевизора. Это позволяет оператору без напряжения рассматривать мельчайшие детали. Благодаря предварительному увеличению разрешающая способность прибора значительно лучше, чем у экрана радиовизора, и приближается к предельной, допускающей длиной волны CO_2 -лазера.

Люминофор для экрана подобран таким образом, что максимум его чувствительности лежит как раз при той температуре, до которой экран нагревается излучением CO_2 -лазера. Поэтому прибор позволяет замечать очень небольшие изменения плотности объектов (до

1%). Такая неоднородность соответствует, например, присутствию в какой-то части объекта примесей в концентрации 10^{15} атомов/см³, т. е. менее одного атома примеси на десять миллионов атомов основного вещества. Такая ничтожная концентрация — предел чистоты материалов, применяемых в современных полупроводниковых устройствах.

В Институте физики АН БССР радиовизоры были использованы для определения концентрации электронов плазмы. Для этого плазма, помещенная в одно из плеч интерферометра, просвечивалась излучением СО₂-лазера (10,6 мкм), а получающаяся интерференционная картина визуализировалась на экране радиовизора. Сдвиг интерференционных полос по сравнению с их положением в отсутствие плазмы позволяет определить ее показатель преломления, а следовательно, концентрацию электронов. Таким образом, с помощью радиовизора можно получать не только качественные, но и количественные данные.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, мы рассказали об основных физических процессах, которые происходят в различных классах люминофоров, позволяющих видеть далеко за границами чувствительности человеческого глаза. Одновременно были приведены некоторые наиболее интересные примеры применения люминесцентных экранов. По-видимому, не имеет смысла повторять здесь сказанное в предыдущих разделах, а лучше указать то, что в них не вошло и заслуживает самостоятельного рассмотрения. В настоящее время успешно развиваются и многие другие методы получения видимых изображений, преимущественно для инфракрасной области спектра. Это, например, пленки жидких кристаллов, изменяющие при небольшом нагревании цвет рассеиваемого ими света, магнитные пленки, в которых нагрев приводит к переориентации намагниченных частиц, наконец, фотопленки, чувствительность которых к обычному видимому свету зависит от локального изменения их температуры и т. д. Все методы визуализации, как люминесцентные, так и нелюминесцентные, обладают определенными преимуществами и недостатками. В некоторых случаях нелюминесцентные методы могут быть серьезными конкурентами для люминесцентных методов. Вместе с тем люминесцентные эк-

раны независимо от типа люминофоров обладают некоторыми общими преимуществами, а именно, электронные (а в кристаллофосфорах — электронно-дырочные) переходы не изменяют химическую структуру вещества, и поэтому число рабочих циклов люминесцентных экранов может быть очень велико. Например, экраны телевизоров безотказно служат в течение тысяч часов. Телевизор обычно выходит из строя из-за того, что портится не экран, а источник его возбуждения.

Освоенная технология промышленного производства люминофоров различного назначения обеспечивает хорошую воспроизводимость их свойств и низкую себестоимость. Практически не существует ограничений на размеры и форму экранов, причем различные современные методы нанесения люминофора гарантируют высокую однородность даже многокомпонентной поверхности (например, трехкомпонентных экранов для цветных телевизоров).

Такие преимущества, конечно, не снижают ценности разработок преобразователей изображений, основанных на других принципах. Однако они делают применение люминофоров предпочтительным, если характеристики изображения, получаемого с помощью люминесцентных экранов, даже несколько хуже, но допустимы для решения определенной научно-технической задачи.

Наконец, новые методы обработки оптических изображений, связанные с применением ЭВМ, которые начали интенсивно развиваться для улучшения качества изображений космических объектов, можно использовать и при работе с люминофорами, визуализирующими невидимые изображения. Имеются и некоторые внутренние резервы улучшения характеристик люминесцентных экранов. Исследования физических процессов, происходящих в люминофорах, продолжают развиваться в целом ряде научных центров как у нас в стране, так и за рубежом. Эти исследования могут привести не только к усовершенствованию существующих классов люминофоров, но и к открытию новых эффектов, в частности, в области низких температур при дополнительном воздействии электрических и магнитных полей. Поэтому есть все основания ожидать, что эта перспективная область применения люминесценции будет развиваться не только в лабораторных, но и в промышленных масштабах.

ЛИТЕРАТУРА

- Вавилов С. И. Глаз и солнце. М., Наука, 1981, 125 с.
- Роуз А. Зрение человека и электронное зрение. М., Мир, 1977, 216 с.
- Левшин В. Л., Левшин Л. В. Люминесценция и ее применение. М., Наука, 1972, 182 с.
- Фок М. В. Введение в кинетику люминесценции кристаллофосфоров. — М., Наука, 1964, 283 с.
- Чукова Ю. П. Антистоксова люминесценция и новые возможности ее применения. — М., Советское радио, 1980, 192 с.
- Гурвич А. М. Рентгенолюминофоры и рентгеновские экраны. — М., Атомиздат, 1976, 153 с.
- Левитин И. Б. Инфракрасная техника. Л., Энергия, 1973, 157 с.
- Ллойд Дж. Системы тепловидения. М., Мир, 1978, 414 с.
- Тимофеев Ю. П., Фридман С. А. Люминесцентное преобразование ИК — СВЧ излучения в видимый свет и его применения. — Известия АН СССР. Серия физическая, 1980, т. 43, № 6, с. 1303—1312.
- Фок М. В. Общие вопросы визуализации изображений. — Труды ФИАН СССР, 1981, т. 129, с. 3—12.

Юрий Петрович Тимофеев
Михаил Владимирович Фок
Самуил Аронович Фридман

ВИДИМ В НЕВИДИМОМ СВЕТЕ

Главный отраслевой редактор **Л. А. Ерлыкин**. Редактор **К. А. Кутузова**. Мл. редактор **Г. И. Родкина**. Обложка художника **Г. Ш. Басырова**. Худож. редактор **М. А. Гусева**, Техн. редактор **С. А. Птицына**. Корректор **В. В. Каночкина**.

ИБ № 5446

Сдано в набор 28.10.82. Подписано к печати 25.01.83. Т 02061. Формат бумаги 84×108¹/₃₂. Бумага тип. № 22. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 3,36. Усл. кр.-отт. 3,57. Уч.-изд. л. 3,45. Тираж 33 150 экз. Заказ 1975. Цена 11 коп. Издательство «Знание», 101835, ГСП, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Индекс заказа 834002.
Типография Всесоюзного общества «Знание», Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.

ДОРОГОЙ ЧИТАТЕЛЬ!

Брошюры этой серии в розничную продажу не поступают, поэтому своевременно оформляйте подписку. Подписка на брошюры издательства „Знание“ ежеквартальная, принимается в любом отделении „Союзпечати“.

Напоминаем Вам, что сведения о подписке Вы можете найти в „Каталоге советских газет и журналов“ в разделе „Центральные журналы“, рубрика „Брошюры издательства „Знание“.

Цена подписки на год 1 р. 32 к.



СЕРИЯ

ФИЗИКА