



НЕКОТОРЫХ ПРИМЕНЕНИЯХ

ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ КОМИТЕТ
СОВЕТА МИНИСТРОВ ЭСТОНСКОЙ ССР

1 X
A-5332 "

Р. Кант.
5. X 60.

О НЕКОТОРЫХ ПРИМЕНЕНИЯХ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

СБОРНИК ДОКЛАДОВ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
ПО ПРИМЕНЕНИЯМ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

*

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ КОМИТЕТ
СОВЕТА МИНИСТРОВ ЭСТОНСКОЙ ССР
ТАЛЛИН 1960

В данном сборнике печатаются доклады, прочитанные на научно-технической конференции, организованной Институтом физики и астрономии Академии наук ЭССР, Тартуским университетом и Советом народного хозяйства Эстонской ССР (г. Тарту, 3—4 марта 1959 г.).

Tartu Riikliku Ülikooli
Raamatukogu

504937

ARHIIVKOGU

О ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЯХ

Ф. Д. КЛЕМЕНТ

Явления люминесценции относятся к тем разделам физики, которые изучались за последний период особенно интенсивно. Это определялось все возрастающим значением этих явлений как для развития наших знаний о строении вещества, так и для многочисленных и разнообразных технических применений.

В области научных исследований люминесценция, т. е. свечение ненакаленных тел, все шире используется как метод изучения самого светящегося тела: испускаемый веществом свет является важным источником сведений, характеризующих состав и строение вещества и происходящие в нем процессы. При этом именно люминесценция, т. е. «холодное» термодинамически неравновесное свечение, а не «обычное» тепловое излучение, может служить источником таких сведений. Как известно, свет, испускаемый накаленным веществом в конденсированной фазе, представляет собой по спектральному составу широкие сплошные полосы, очень мало характеризующие вещество, в то время как спектры люминесценции в большинстве случаев тесно связаны с природой люминесцирующего объекта.

Также и кинетика, т. е. протекание во времени процесса люминесценции, отражает сложный подчас механизм тех явлений, которые ведут к испусканию света. Изменение же во времени интенсивности теплового излучения отражает лишь изменение температуры светящегося тела.

Еще более широк круг непосредственно практических применений люминесценции. Некоторые из них, например, рентгеновский люминесцирующий экран, имеют более, чем полувековую давность, и относятся к тому периоду, когда наши теоретические знания о природе явления люминесценции были еще очень примитивны. Некоторые применения, например, люминесцентные лампы, телевизор с его люминесцирующим экраном, широко внедряются в быт. Но большое количество уже существующих и еще возможных приложений люминесценции до сих пор мало известно широким кругам инженерно-технических работников.

Задачи дальнейшего технического прогресса, стоящие перед нашей страной на нынешнем этапе ее развития, требуют всемерного использования научных достижений в интересах практики.

Данный сборник, содержащий часть докладов, прочитанных на научно-технической конференции по применениям люминесценции, созванной Академией наук Эстонской ССР, Тартуским государственным университетом и Советом народного хозяйства Эстонской ССР в марте 1959 г., имеет целью ознакомить практиков с некоторыми из разработанных уже применений люминесценции и содействовать этим более быстрому внедрению люминесценции в различные отрасли техники. В данной статье мы имеем в виду проанализировать некоторые особенности самого явления люминесценции, лежащие в основе различных ее применений, раскрыть этим возможности дальнейшего развития этих применений и дать толчок к самостоятельной работе практиков по использованию люминесценции при решении тех или других конкретных технических задач.

В процессе люминесценции различные виды энергии (кроме тепловой) преобразуются в энергию испускаемого света. Соответственно тому, какой именно вид энергии преобразуется в свет, т. е. возбуждает свечение, мы имеем разные виды самой люминесценции. В ходе фотолюминесценции в энергию испускаемого света преобразуется световая же энергия, но других длин волн, в частности, и невидимых участков спектра. Так как процесс фотолюминесценции подчиняется в обычных условиях правилу Стокса, по которому длина волны испускаемого света больше длины волны возбуждающего света, то видимое свечение может возбуждаться как более коротковолновыми участками видимого же света, так и ультрафиолетовым светом или еще более коротковолновыми лучами, но не может возбуждаться инфракрасным светом. Свечение с испусканием инфракрасного света также может возбуждаться всеми более коротковолновыми участками спектра, включая более коротковолновую инфракрасную, а также видимую и ультрафиолетовую области и т. д. Отметим, что ряд веществ люминесцирует, испуская ультрафиолетовый свет.

В том случае, когда длина волны возбуждающих лучей лежит в области рентгеновского спектра, процесс свечения носит название рентгенолюминесценции.

При катодолюминесценции свечение возбуждается катодными лучами, т. е. пучком электронов за счет их кинетической энергии. Интенсивность свечения в этом случае зависит как от скорости электронов, т. е. ускоряющего напряжения, так и от плотности тока. Для разных веществ существуют пороговые значения скорости электронов, ниже которых свечение данного вещества не возбуждается.

Носителями возбуждающей энергии могут быть также излучения радиоактивных веществ (α -, β - и γ -лучи). В этом случае мы имеем дело с радиолюминесценцией, называемой часто также сцинтилляцией, когда речь идет о свечении под действием α -частиц.

Свечение ряда веществ может возникать за счет энергии переменного электрического поля достаточно высокой напряженности, например, между обкладками конденсатора. Интенсивность наблюдающейся при этом электролюминесценции зависит как от напряженности поля, так и от его частоты.

Свечением люминесцентного типа (т. е. «холодным» свечением) может сопровождаться ряд химических реакций. Высвобождающаяся в ходе таких реакций энергия обращается непосредственно в свет без промежуточного превращения в тепло, как это имеет место при тепловом излучении, возникающем, например, при горении. Этот вид люминесценции, называемый хемилюминесценцией, наблюдается часто в естественных условиях, например, при гниении некоторых растительных и животных продуктов, а также в ходе ряда искусственно воспроизводимых реакций. Явление хемилюминесценции часто наблюдается в некоторых живых организмах (биолюминесценция).

Близкие к хемилюминесценции по своей природе процессы свечения возникают при кристаллизации ряда веществ (кристаллолюминесценция), а также при раздроблении некоторых кристаллов (триболюминесценция).

Свечение характера люминесценции в некоторых веществах вызывают механические колебания ультразвуковой частоты. Природа этого явления, называемого иногда сонолюминесценцией, до сих пор еще не изучена.

Далеко не все тела природы способны светиться под воздействием только что рассмотренных факторов. Если в достаточно разреженном состоянии способны люминесцировать все газы и пары, состоящие из одноатомных молекул и в ряде случаев — из более сложных молекул, то в конденсированной фазе (жидкой или твердой) эта способность присуща более узкому классу веществ. Известно, что могут люминесцировать ряд чистых жидкостей и кристаллов, однако, наиболее широкий класс люминесцирующих веществ — это различные жидкие и твердые растворы, в которых способность к свечению вызывается присутствием небольших количеств растворенного вещества, являющегося обычно непосредственным носителем свечения. К этому классу веществ относятся многие естественные минералы, в которых имеется примесь посторонних веществ, например, виллемит. Однако технически наиболее важный класс люминесцирующих веществ — это искусственно приготовленные твердые растворы, т. е. кристаллы и мелкокристаллические порошки с примесью посторонних веществ (активаторов). Этот класс светящихся веществ называют обычно кристаллофосфорами или просто люминофорами.

Искусственное приготовление светящихся составов представляет собой в настоящее время особую отрасль препаративной химии. Так как способность к свечению возникает у многих ве-

ществ уже при ничтожно малых количествах примесей (порядка тысячных долей процента и меньше), а, с другой стороны, некоторые примеси в таких же малых количествах способны тушить свечение, то особенностью химии люминофоров являются очень высокие требования к чистоте исходных препаратов. Именно в химии люминофоров были разработаны наиболее тонкие методы предельной очистки химических веществ.

Испускаемый люминесцирующими веществами свет характеризуется несколькими параметрами. Каждый люминофор имеет свой спектр свечения и спектр возбуждения (в случае фотолюминесценции). Спектр свечения большинства кристаллофосфоров представляет собой более или менее широкие полосы, охватывающие область в несколько десятков или сотен $m\mu$. Вместе с тем известны также люминофоры с очень узкими почти линейчатыми спектрами (например, активированные редкоземельными металлами). В настоящее время известны составы со свечением в любой области спектра, включая видимую и ближайшие области ультрафиолетового и инфракрасного спектра.

Спектры возбуждения, т. е. те области спектра, в которых возбуждается свечение данного вещества и в которых это вещество способно поглощать падающую радиацию, также состоят обычно из широких полос, смещенных по правилу Стокса в сторону коротких длин волн по отношению к спектру свечения.

Спектры свечения и возбуждения довольно часто несколько перекрываются, хотя известны также вещества, в которых эти спектры хорошо разделены.

Спектры кристаллофосфоров определяются в основном природой активатора, но зависят также в значительной степени от характера основного вещества, в которое вводится примесь. В некоторых пределах спектр может варьироваться в зависимости от концентрации активатора.

Другой характеристикой свечения люминофора является его яркость. Она зависит как от интенсивности возбуждения, так и от свойств самого вещества: в разных веществах разная доля поглощенной энергии обращается в свет, т. е. разные вещества характеризуются разным выходом свечения.

Выход свечения может понижаться под влиянием разных тушащих факторов. Повышение концентрации активатора сверх оптимального ее значения, очень различного для разных составов, приводит к так называемому концентрационному тушению свечения. Тушится свечение и при повышении температуры, начиная с некоторых ее значений, также очень различных для разных составов (температурное тушение). Известны составы, продолжающие интенсивно светиться при температуре в несколько сотен $^{\circ}C$, но есть вещества, свечение которых уже полностью потушено при комнатных температурах и которые светятся лишь при очень низких температурах.

На многие составы тушащим образом действует облучение их длинноволновой, в частности, инфракрасной радиацией.

Наконец, на выход свечения сильно влияет присутствие некоторых посторонних примесей помимо активатора. Так, например, даже небольшие следы железа, никеля, кобальта могут полностью уничтожить способность свечения у некоторых люминофоров.

Третьей важнейшей характеристикой люминофоров является длительность «послесвечения», т. е. того свечения, которое продолжается после прекращения возбуждающего воздействия, а также закон, по которому затухает свечение после прекращения возбуждения. Эти особенности светящегося вещества отражают кинетику связанных с актом свечения процессов и определяют инерционные свойства свечения. Длительность послесвечения у разных веществ варьируется в очень широких пределах. Известны вещества, у которых послесвечение длится всего лишь миллиардные доли секунды, у других же оно продолжается часами, сутками и более, хотя и с небольшой интенсивностью.

На длительность послесвечения влияют разные внешние воздействия. Особенно сильно зависит послесвечение от температуры: с повышением температуры длительность спадает, а при достаточно низкой температуре высвечивание энергии, запасенной при возбуждении, во многих веществах может прекратиться, и вещество сколь угодно долго сможет сохранять эту энергию, высветив ее при повышении температуры или под действием других факторов.

К числу таких факторов относится лучистая энергия, которая может не только возбуждать свечение, но и ускорять высвечивание. Такое действие, в частности, может оказывать инфракрасная радиация, способная вызывать у некоторых фосфоров резкую вспышку свечения за счет более быстрого высвечивания запасенной энергии.

Подобное же действие может оказывать приложение электрического поля достаточно высокой напряженности.

Эти краткие сведения об особенностях процессов люминесценции позволяют понять основные принципы, на которых основаны различные практические применения люминесценции.

В технически наиболее важной группе применений, которую мы можем назвать индикацией невидимых процессов, используется тот факт, что в процессе люминесценции могут превращаться в видимый свет различные невидимые формы энергии (рентгеновские, электронные, ультрафиолетовые лучи, излучение радиоактивных веществ и др.). Тем самым люминесценция может помочь увидеть то, что непосредственно не поддается наблюдению глазом. При этом в соответствии с особенностями глаза, как органа чувств, дающего наиболее полное представление об окружающем мире, люминесцирующий экран дает не только сигнал о существовании того энергетического воздействия,

которое вызвало свечение экрана, но и представление об интенсивности сигнала, которую мы можем измерить по яркости свечения. Более того, люминесцирующий экран дает возможность судить о пространственном распределении энергии этого сигнала, т. е. позволяет наблюдать картину явления. К этой группе применений люминесценции относится, например, рентгеноскопическая установка, катодный осциллограф, телевизор, электронный микроскоп, радиолокатор, электронно-оптический преобразователь, ультрафиолетовый микроскоп для визуальных наблюдений и т. д. Во всех этих приборах конечным звеном является люминесцирующий экран, дающий визуально наблюдаемую картину самых различных процессов.

Высокая чувствительность современных фотоэлектрических методов световых измерений позволяет с помощью люминесцирующего кристалла обнаруживать и измерять крайне слабые радиоактивные излучения. На этом основаны сцинтилляционные счетчики, приобретающие все большее значение в связи с быстро развивающимся использованием атомной энергии.

Вызывать люминесценцию может не только энергия несветового характера, но и видимый свет. С другой стороны, сама люминесценция может заключаться в испускании не только видимого, но и ультрафиолетового или инфракрасного света. В результате люминесцирующее вещество может играть роль своеобразного спектрального трансформатора, преобразующего один участок спектра в другой.

Возможность преобразовать световую энергию в пучок электронов с помощью фотоэлемента, затем увеличить энергию этого пучка с помощью электрического поля, после чего вновь вызвать свечение, облучая электронами люминесцирующий экран, позволяет увеличить яркость слабых световых картин.

На уже возбужденный люминесцирующий экран, как уже отмечалось, могут влиять и такие формы энергии, которые сами не в состоянии возбудить люминесценцию (тепло, инфракрасные лучи, ультразвуковые колебания). Известны также различные способы многоступенчатых преобразований одной формы энергии в различные другие. Вследствие этого число тех явлений, которые могут быть сделаны наблюдаемыми глазом с помощью люминесценции, значительно расширяется. Так, существует люминесцентная термография, дающая картину распределения температуры вдоль поверхности. Известны люминесцентные методы инфракрасной фотографии. Изобретены приборы по «визуализации» человеческой речи, позволяющие глухим непосредственно «читать звуки», преобразованные в изображения на люминесцирующем экране.

Применительно к конкретным требованиям той или другой технической задачи возможно огромное разнообразие почти любых других комбинаций, в которых первым звеном является какой-либо невидимый сигнал, а конечным звеном — видимое

изображение этого сигнала, отражающее те или другие его особенности (местоположение, интенсивность, конфигурация, изменение во времени и т. д.). В этом отношении перед любым конструктором, изобретателем, рационализатором — неограниченные возможности использования люминесцирующего экрана как конструктивного элемента современного приборостроения.

Если в обрисованной группе применений люминесценции свечение вещества используется как индикатор какого-то иного процесса, то в другой группе применений испускаемый люминофором свет интересует нас сам по себе. Речь идет о люминесцентных источниках света. Высокая экономичность этих источников, связанная с гораздо большим выходом свечения в процессе люминесценции, чем в процессе теплового излучения, возможность в широких пределах варьировать спектральный состав свечения (источники цветного свечения, высокоэкономичные источники ультрафиолетового и инфракрасного свечения), «холодность» источника, что также важно в ряде технических устройств — все это делает люминесцентные лампы перспективной отраслью современной светотехники.

В данном сборнике имеется специальная статья, посвященная люминофорам для люминесцентных ламп. Поэтому мы не останавливаемся подробнее на этой группе применений люминесценции.

Характер свечения люминесцирующего вещества в сильной степени зависит от химической природы и физического состояния этого вещества. На этом основана следующая большая группа применений люминесценции — так называемый люминесцентный анализ, в котором по особенностям свечения (спектр, яркость, длительность) мы судим о химическом составе, сорте или качестве вещества или изделия. По сравнению с обычным химическим анализом люминесцентный анализ имеет ряд больших преимуществ. Одна из них — высокая чувствительность люминесцентных методов, обусловленная тем, что для появления люминесценции достаточно ничтожно малых количеств вещества, а чувствительность глаза или фотоэлемента с современной усиленной схемой позволяет наблюдать даже крайне слабое свечение. Ряд веществ обнаруживается по их люминесценции при концентрации в 10^{-10} — 10^{-11} г на г растворителя, а абсолютная чувствительность достигает примерно 10^{-12} — 10^{-15} г. Это обстоятельство придает люминесцентному анализу особенно важное значение при биологических (в частности, физиологических) исследованиях, так как присутствие в живых организмах многих жизненно важных веществ (например, гормонов) из-за их ничтожно малых концентраций не обнаруживается обычными химическими методами.

Другая особенность люминесцентного анализа — его быстрота и простота для многих несложных случаев, когда достаточно облучить изучаемый объект возбуждающим светом, чтобы по

характеру люминесценции установить присутствие интересующего нас вещества. Правда, в более сложных случаях требуется предварительная химическая обработка изучаемой системы.

Существенное для биологии свойство люминесцентного анализа — возможность осуществлять его без уничтожения (а иногда даже без умерщвления) исследуемого объекта.

Несмотря на ряд недостатков (ограниченная применимость, часто малая характеристичность), люминесцентный анализ тем не менее находит все более широкое применение в химии, геологии, биологии, медицине, товароведении, криминалистике и т. д. Известны такие разновидности люминесцентного анализа, как люминесцентная микроскопия, дефектоскопия и др. Дальнейшее развитие люминесцентного анализа связано с разработкой различных «люминесцентных реакций», ведущих к преобразованию нелюминесцирующих веществ в люминесцирующие и к выделению последних.

Мы ограничиваемся этой общей характеристикой люминесцентного анализа, так как по технике и методике этого анализа имеется уже значительная, в том числе и популярная, литература. Некоторые виды люминесцентного анализа охарактеризованы в одной из статей настоящего сборника.

Следующая группа применений люминесценции связана с инерционными свойствами люминесцентных процессов. Акт поглощения возбуждающей энергии и акт излучения света разделены во времени в разной степени в различных веществах. С этим и связаны те различия в длительности свечения (послесвечения), о которых говорилось выше. Разнообразие свойств различных люминесцирующих составов в этом отношении позволяет использовать их при решении задач, требующих растягивания во времени или даже перенесения во времени наблюдения за тем или другим процессом или использования соответствующей световой энергии. Мы можем с помощью люминесцирующего экрана иметь практически безинерционную реакцию на внешнее воздействие (с запаздыванием в 10^{-9} — 10^{-8} сек). Но для более удобного рассматривания кратковременных (импульсных) процессов и фиксации их на достаточно продолжительное время возможно использование люминесцирующих экранов с послесвечением необходимой длительности. Так как ряд веществ способен высвечивать запасенную при возбуждении энергию лишь при повышении температуры или при иных воздействиях на возбужденный экран, возможно использование экранов в виде своеобразных световых аккумуляторов для запасания световой энергии. При этом высвечивание запасенной энергии может идти непрерывно, начиная с момента возбуждения и до полного затухания, либо импульсно через то или другое время после прекращения возбуждения под влиянием соответствующего воздействия.

На этих свойствах люминесценции основано использование светящихся красок и пластмасс с длительным послесвечением

в целях, например, аварийного освещения. С накоплением и последующим высвечиванием энергии возбуждения связано также устройство люминесцентных дозиметров рентгеновского или радиоактивного излучения. Возможно использование соответствующих экранов с функциями «памяти» в надлежащих приборах и т. д.

Возможны также и различные другие применения люминесценции, основанные на комбинации тех или других свойств процессов люминесценции. Известно существование люминесцентной живописи, использование люминесценции в архитектурном проектировании, в декоративном искусстве, при комбинированных киносъемках и т. д. Некоторым из этих применений в настоящем сборнике посвящены также специальные статьи.

В наш век широкой механизации и автоматизации различных производственных и технических процессов люминесценция имеет большие перспективы многообразного использования. Дальнейшее развитие применений люминесценции в большой степени зависит от того, насколько тесным будет содружество ученых, изучающих природу и закономерности этого интересного явления, и инженерно-технических работников, непосредственно его использующих и ставящих перед учеными все новые задачи.

ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СЧЕТЧИКИ ЯДЕРНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

М. Д. ГАЛАНИН

Широкое развитие научных исследований в области ядерной физики, развитие ядерной энергетики, применение ядерных излучений и радиоактивных изотопов делают очень важной разработку различных способов обнаружения и измерения ядерных излучений. Люминесценция для этих целей используется уже давно, но только за последние 12 лет ее применение получило большое развитие. Еще более пятидесяти лет тому назад появился спинтарископ Крукса, в котором α -частицы, испускаемые радиоактивными веществами, наблюдались по вызываемым ими вспышкам (сцинтилляциям) на экране из сернистого цинка. Сцинтилляции наблюдались просто глазом в лупу или микроскоп. Этим методом были проведены опыты Резерфорда по рассеянию α -частиц, из которых впервые было сделано заключение о существовании атомного ядра.

В дальнейшем этот метод регистрации частиц был вытеснен другими — появились счетчики Гейгера, которые надолго стали одними из наиболее важных приборов ядерной физики. Наряду со счетчиками большое применение получила камера Вильсона и специальные фотоэмульсии, при помощи которых можно наблюдать следы частиц.

Начиная с 1947 г. происходит возрождение люминесцентного метода регистрации частиц на новой технической основе. Кальман в Германии и Кольтман и Маршал в США предложили счетчик вспышек люминесценции — сцинтилляций, основанный на сочетании люминесцирующего вещества с фотоэлектронным умножителем. Фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) представляет собой вакуумный прибор, в котором, кроме фотоэффекта, используется явление вторичной эмиссии электронов. В современном ФЭУ, применяемом в сцинтилляционном счетчике, обычно делается полупрозрачный фотокатод и целая система так называемых эмиттеров. Электрон, вырванный светом из фотокатода, ускоряется электрическим полем и ударяется об эмиттер. В результате вторичной эмиссии из эмиттера вырывается уже несколько электронов, которые ударяются о следующий эмиттер и т. д. Коэффициент усиления, т. е. число электронов на

выходе умножителя, получившихся от одного электрона, вылетевшего из фотокатода, у современных ФЭУ достигает 10^6 — 10^7 .

Обычная схема сцинтилляционного счетчика показана на рис. 1. Люминесцирующий кристалл помещается у окна ФЭУ, на которое нанесен полупрозрачный фотокатод. Под действием, например, γ -кванта в кристалле возникает световая вспышка, которая преобразуется фотоумножителем в электрический импульс. На выходе умножителя ставится усилитель, затем — специальное устройство — анализатор импульсов, позволяющее отбирать импульсы определенной величины и, наконец, счетчик импульсов.

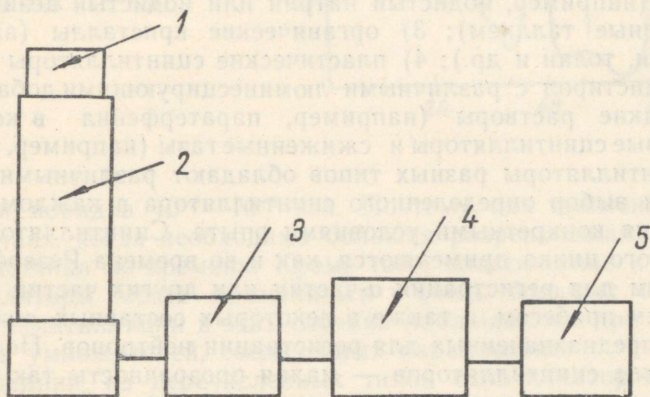


Рис. 1. Принципиальная схема сцинтилляционного счетчика:

1 — кристалл; 2 — ФЭУ; 3 — усилитель; 4 — анализатор; 5 — счетчик.

Сцинтилляционный счетчик обладает большой чувствительностью ко всем видам излучения, способен различать и измерять энергию частиц и обладает быстротой действия и, следовательно, высокой разрешающей способностью по времени, превышающей другие методы регистрации частиц. Эти преимущества сцинтилляционного счетчика привели к тому, что в настоящее время он стал одним из самых необходимых приборов не только в ядерной лаборатории, но и в ряде областей науки и техники. Ни одна большая работа по ядерной физике не делается в настоящее время без сцинтилляционных счетчиков. Сцинтилляционные счетчики применяются также в радиационной геологической разведке руд и нефти, в радиобиологии и радиохимии, для дозиметрии радиоактивных излучений и т. д.

Как видно из рис. 1, сцинтилляционный счетчик состоит из трех основных элементов: люминесцирующего вещества, которое получило название сцинтиллятора, фотоэлектронного умножителя и дальнейшей счетной или измерительной схемы. Из этих трех элементов дальше речь будет идти только о первом.

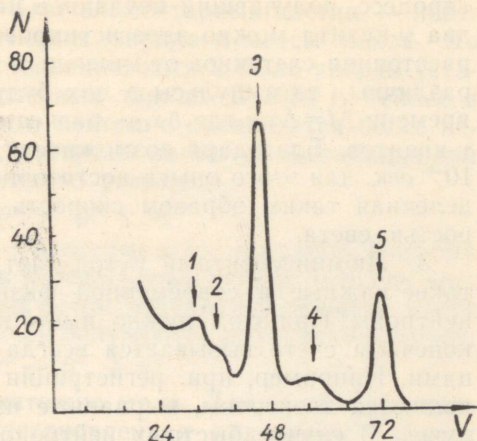
В зависимости от условий применения к сцинтилляторам предъявляются различные требования. Во всех случаях требуется возможно более высокий выход люминесценции, спектр излучения, подходящий к чувствительности ФЭУ, высокая прозрачность. Обычно желательно также иметь короткое время свечения. В настоящее время разработан и применяется широкий набор различных сцинтилляторов, которые в той или иной степени удовлетворяют различным требованиям. Существующие сцинтилляторы можно разделить на следующие шесть основных типов: 1) люминофоры на основе сернистого цинка, активированного медью или серебром; 2) щелочно-галоидные монокристаллы (например, йодистый натрий или йодистый цезий, активированные таллием); 3) органические кристаллы (антрацен, стильбен, толан и др.); 4) пластические сцинтилляторы (например, полистирол с различными люминесцирующими добавками); 5) жидкие растворы (например, паратерфенил в ксилоле); 6) газовые сцинтилляторы и сжиженные газы (например, ксенон).

Сцинтилляторы разных типов обладают различными свойствами, и выбор определенного сцинтиллятора в каждом случае диктуется конкретными условиями опыта. Сцинтилляторы типа сернистого цинка применяются, как и во времена Резерфорда, в основном для регистрации α -частиц или других частиц с очень коротким пробегом, а также в некоторых составных сцинтилляторах, предназначенных для регистрации нейтронов. Недостаток этого типа сцинтилляторов — малая прозрачность, так как они обычно имеются в мелкокристаллическом виде. Очень важным типом сцинтилляторов являются щелочно-галоидные кристаллы. Их большая плотность и, следовательно, сильное поглощение в них γ -лучей делает эти сцинтилляторы наиболее эффективными для регистрации этого вида излучения. Эффективность сцинтилляционного счетчика (т. е. отношение числа регистрируемых γ -квантов к числу падающих на счетчик) во много раз превышает эффективность счетчиков Гейгера. Но особенно важное свойство щелочно-галоидных сцинтилляторов — возможность с их помощью определять энергию частиц. В настоящее время большое развитие получила так называемая сцинтилляционная спектрометрия, применяемая для изучения спектров β - и γ -лучей. Схема сцинтилляционного счетчика (рис. 1) должна включать в этом случае высокосовременный анализатор импульсов, и подсчет числа импульсов различной величины дает возможность непосредственно судить о спектре энергии падающего на кристалл излучения. Это облегчается тем, что в щелочно-галоидных кристаллах интенсивность сцинтилляций в широких пределах пропорциональна поглощенной в кристалле энергии частицы. На рис. 2 в качестве примера приведен сцинтилляционный спектр γ -лучей радиоактивных изотопов цинка и цезия.

Следующие три типа сцинтилляторов относятся к органическим веществам и их главное свойство — очень короткое время

Рис. 2. Сцинтилляционный спектр γ -лучей радиоактивных изотопов Zn^{65} и Cs^{137} .

V — относительная величина импульсов, N — число импульсов. 1 — максимум от комптоновских электронов Cs^{137} ; 2 — максимум от сцинтилляций, вызванных парами электрон-позитрон, получившимися под действием γ -лучей Zn^{65} ; 3 — фотоэлектроны от γ -лучей Cs^{137} (энергия 0,661 Мэв); 4 — комптоновские электроны Zn^{65} ; 5 — фотоэлектроны от γ -лучей Zn^{65} (1,12 Мэв).



вспышки, порядка 10^{-8} — 10^{-9} сек. Поэтому они применяются в тех случаях, когда необходима большая разрешающая способность счетчика во времени. Кроме того, пластические и жидкие сцинтилляторы могут применяться в очень больших объемах, причем сцинтилляции в этих случаях наблюдаются при помощи десятков умножителей, соединенных параллельно.

Последний из перечисленных типов сцинтилляторов (типа ксенона) обладает высокими качествами, но мало исследован и область его применения еще не определилась.

Приведем несколько примеров работ в области ядерной физики с использованием сцинтилляционных счетчиков. Цель этих примеров — показать те возможности, которые дает применение люминесценции, и те требования, которые предъявляет ядерная физика к люминесцирующим веществам. Поэтому сами опыты будут описываться только схематически.

1. В дополнение к тому, что было сказано выше о сцинтилляционной спектрометрии, необходимо указать, что, кроме простейшей схемы, данной на рис. 1, разработаны также более сложные схемы, в которых употребляются два или три люминесцирующих кристалла. В последнее время особенно успешно развивается спектрометрия γ -лучей, для которой используются очень большие однородные монокристаллы (диаметром 10, 20 и более см). В таких кристаллах γ -лучи сильно поглощаются, и сцинтилляционный спектр значительно упрощается.

2. В качестве примера высокого временного разрешения можно привести следующий опыт, который был осуществлен с помощью органических сцинтилляторов. Как известно, положительный электрон-позитрон существует в обычных условиях короткое время и, соединяясь с каким-либо электроном вещества, образует два γ -кванта, разлетающихся в разные стороны

(процесс, получивший неудачное название «аннигиляции»). Эти два γ -кванта можно зарегистрировать двумя счетчиками. Если расстояния счетчиков от мишени, в которую ударяется позитрон, различны, то импульсы в них будут разделены промежутками времени $\Delta t = \Delta x/c$ где Δx — разность расстояний, а c — скорость γ -квантов. Благодаря возможности разрешать времена порядка 10^{-9} сек, для этого опыта достаточно очень небольших Δx . Определенная таким образом скорость c , совпала, конечно, со скоростью света.

3. Люминесцентный метод дает возможность регистрировать такие важные в современной физике и технике частицы, как нейтроны. При этом нужно иметь в виду, что люминесценция в конечном счете вызывается всегда только заряженными частицами. Например, при регистрации γ -лучей такими частицами являются электроны, вырванные из атомов при поглощении γ -лучей. В случае быстрых нейтронов сцинтилляции вызываются протонами, которые выбиваются нейтронами из веществ, содержащих водород. Для этого применяются смешанные сцинтилляторы, например, полистирол, в который запрессован сернистый цинк. Для медленных нейтронов может быть использована смесь сернистого цинка с веществами, содержащими бор. Атом бора, захватывая нейтрон, превращается в литий, а вылетающая при этой реакции частица вызывает сцинтилляцию в ZnS.

4. Чтобы дать представление о масштабах применения жидких сцинтилляторов, можно указать на счетчик, состоящий из 500 литров сцинтилляционного раствора и 108 фотоумножителей. Такого рода счетчики применялись, например, для измерения радиоактивности человека, вызванной естественно содержащимся в человеческом организме радиоактивным изотопом калия (K^{40}) или радиоактивными загрязнениями. Схема первоначальной модели такого счетчика (с 150 л раствора и 45 ФЭУ) показана на рис. 3.

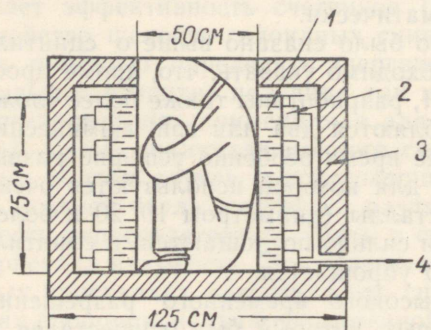
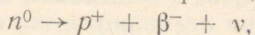


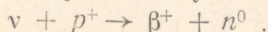
Рис. 3. Схема большого жидкостного счетчика:
1 — жидкий сцинтиллятор; 2 — фотоэлектронный умножитель; 3 — свинцовая защита; 4 — к усилителю, анализатору и счетчику.

В заключение приведем две выдающиеся работы в области ядерной физики, при выполнении которых сцинтилляционные счетчики сыграли существенную роль.

Одна из самых «неуловимых» элементарных частиц — нейтрино — это частица, не имеющая заряда и массы покоя. До последнего времени ее существование, хотя и было твердо установлено, но следовало из косвенных данных. В 1954 г. Рейнес и Коуэн провели опыт, в котором нейтрино проявляется более непосредственно. Как известно, нейтроны являются нестабильными частицами и распадаются согласно реакции:



где p^+ обозначает протон, β^- — электрон и ν — нейтрино. Поэтому вблизи ядерных реакторов, в которых выделяется большое число нейтронов, имеется мощный поток нейтрино. Нейтрино могут реагировать с протонами, причем получаются позитрон и нейтрон:



Вероятность этой реакции ничтожно мала. Для ее обнаружения была применена система, установленная под землей вблизи мощного реактора, состоявшая из бака с водой с примесью соединения кадмия и прилегающих к нему двух жидких сцинтилляторов объемом несколько сот литров со 150 ФЭУ. Получившийся в результате реакции позитрон захватывается каким-либо электроном и дает два γ -кванта, которые вызывают вспышки одновременно в обоих сцинтилляторах (рис. 4). Нейтрон диффундирует и через некоторое время захватывается кадмием, давая несколько γ -квантов, которые также регистрируются обоими сцинтилляторами. В результате получается пара совпадений импульсов, разделенных временем в несколько микросекунд. Авторы наблюдали около 3 таких событий в час, что согласовалось с предсказаниями теории.

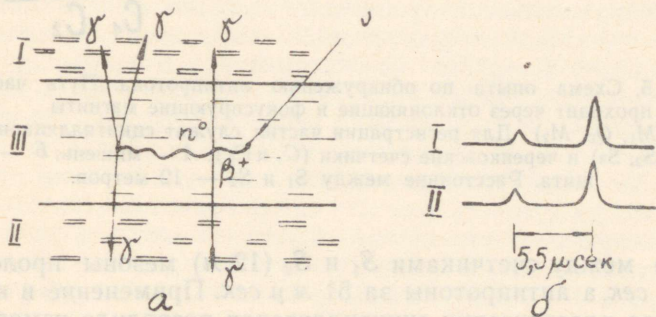


Рис. 4. а — схема опыта по обнаружению реакции с нейтрино:

I, II — сцинтилляторы; III — вода с примесью соединений кадмия:

ν — нейтрино; β^+ — позитрон; n^0 — нейтрон; γ — γ -кванты.

б — осциллограмма импульсов в сцинтилляторах I и II.

Другая и более важная работа в области ядерной физики, в которой наряду с другими средствами были применены сцинтилляторы — открытие антипротона (1955 г.). Антипротоны об-

разовывались при ударе о мишень частиц, разогнанных в ускорителе до очень больших энергий. Основная трудность при этом заключалась в том, чтобы выделить антипротоны на фоне большого числа других частиц — π -мезонов. Для этого, в частности, использовалось различие их масс и, следовательно, скорости. По условиям опыта (см. рис. 5) можно было ожидать, что рас-

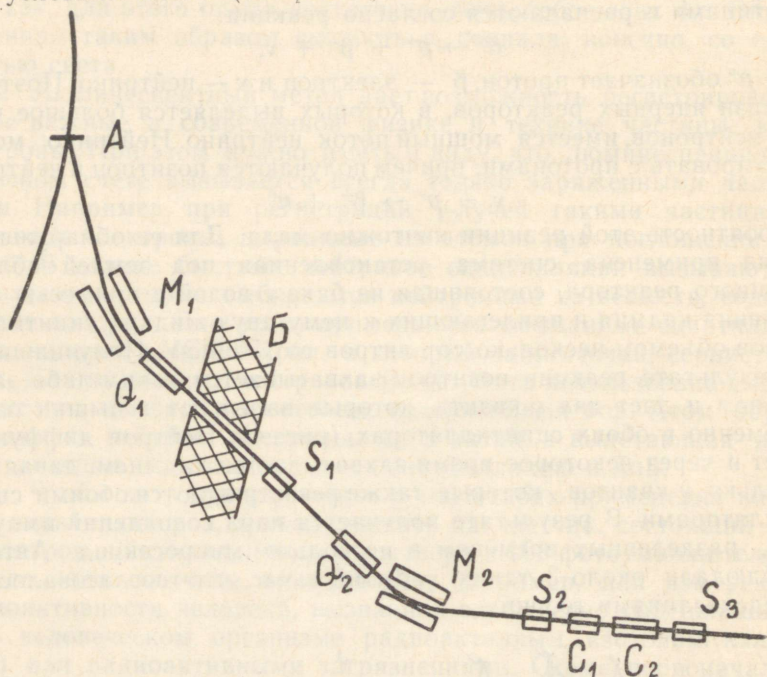


Рис. 5. Схема опыта по обнаружению антипротона. Путь частиц проходит через отклоняющие и фокусирующие магниты (Q_1 , M_1 , Q_2 , M_2). Для регистрации частиц служат сцинтилляционные (S_1 , S_2 , S_3) и черенковские счетчики (C_1 и C_2). А — мишень; Б — защита. Расстояние между S_1 и S_2 — 12 метров.

стояние между счетчиками S_1 и S_2 (12 м) мезоны пролетят за 40 м μ сек, а антипротоны за 51 м μ сек. Применение в качестве счетчиков пластических сцинтилляторов позволило измерять эти времена с точностью 1 м μ сек. Отметим, что еще более существенную роль в этой работе сыграли так называемые черенковские счетчики, в которых наблюдается вспышка, обусловленная уже не люминесценцией, а излучением Вавилова-Черенкова.

Задача этого очень краткого обзора — показать плодотворность и важность применения люминесценции для регистрации ядерных излучений, и он не претендует на какую-либо полноту.

Нужно указать, однако, что мы не упомянули здесь других методов применения люминесценции, основанных не на наблюдении сцинтилляций, а на запасании энергии радиоактивных излучений в люминофорах с последующим ее высвечиванием, что успешно используется для дозиметрии излучений. Ничего не было сказано также о замечательном развитии люминесцентного метода, разработанного Завойским с сотрудниками, который дал возможность не только регистрировать частицы, но и наблюдать пути их пролета (треки частиц) в люминесцирующем кристалле (так называемой люминесцентной камере). Тем не менее из сказанного должно быть ясно, какое большое место заняла люминесценция в обнаружении и измерении ядерных излучений.

ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕЕ ПРИМЕНЕНИЯ

И. Н. ОРЛОВ

1. ВВЕДЕНИЕ

Во многих видах люминесценции или «холодного» свечения кристаллических веществ (фото-, катодо-, рентгенолюминесценции и др.) энергия электрического поля используется не для возбуждения свечения, а для создания потока быстрых электронов в вакууме или разряженном газе. Энергия же этих частиц используется либо для прямого возбуждения люминесценции кристаллов, либо преобразуется сначала в энергию электромагнитных колебаний различной длины волны (ультрафиолетовые или рентгеновские лучи), которые и возбуждают свечение кристаллов. В противоположность такому «многоступенчатому» преобразованию электрической энергии в холодное свечение кристаллов, электролюминесценция есть преобразование электрической энергии непосредственно внутри кристалла в свечение люминесценции. До 1950 г. это явление представляло чисто академический интерес. С момента же создания эффективных электролюминесцирующих материалов и разработки практически приемлемой конструкции «светящихся конденсаторов» возможность широкого использования электролюминесценции для практических целей привлекла к себе внимание исследователей и инженеров из различных областей науки и техники. В течение последнего десятилетия опубликовано большое число работ, касающихся вопросов физики электролюминесценции, синтеза электролюминесцирующих материалов и разработки оригинальных приборов различного назначения, использующих явление электролюминесценции. Довольно полное представление о состоянии проблемы в целом и о направлениях практического использования электролюминесценции можно получить из ряда обзорных статей, опубликованных в последние годы [1—8].

Различают два типа электролюминесценции:

1) Эффект Лосева (1923 г.), возникающий только при наличии непосредственного контакта подводящих электродов с кристаллами электролюминесцирующего вещества, т. е. при обеспечении условий протекания тока через кристалл. Яркость свечения кристалла в этом случае пропорциональна току через кристалл. В некоторых случаях, когда в кристалле имеется так на-

зываемый *pn* — переход, свечение возникает при напряжении на кристалле всего в несколько вольт в пропускном направлении. Такой тип свечения называют «электролюминесценцией, управляемой током». Изучено свечение подобного типа в кристаллах карбида кремния, кремния, германия, антимонидов, арсенидов и фосфидов галлия и индия, сульфидов кадмия и цинка, силиката и фторида цинка, окислов алюминия и олова и других веществ. В большинстве указанных веществ эффективность преобразования электрической энергии в энергию излучения очень низка (например, 1 квант света на миллион носителей тока, прошедших через кристалл карбида кремния). Поэтому данный тип электролюминесценции пока не представляет практического интереса для создания приборов, но имеет большое теоретическое значение для изучения физики твердого тела.

2) Эффект Дестрио (1936 г.), возникающий в порошковых материалах, равномерно распределенных в диэлектрике и помещаемых между электродами плоского конденсатора. Свечение наблюдается при средних полях на слое порядка 10^3 — 10^5 в/см. Свечение в каждой из частиц порошка локализуется в небольших областях, в которых, как предполагают, происходит местная концентрация поля вплоть до величины пробойного поля кристалла. Такая концентрация полей возникает из-за химической неоднородности зерна электролюминофора (многофазности его). Именно эта особенность электролюминофоров ограничивает пока ассортимент наиболее эффективных материалов всего несколькими представителями группы цинк-сульфидных люминофоров, т. к. требует разработки способов приготовления многофазных материалов с наиболее подходящими для электролюминесценции электрическими свойствами. Имеющиеся в настоящее время порошковые электролюминофоры уже обеспечивают по своим характеристикам решение ряда важных направлений в создании новых приборов. Этот тип свечения называется «электролюминесценцией, управляемой полем», и наиболее интенсивно изучается с точки зрения практических применений.

Обычно совместно с «чистой» электролюминесценцией, т. е. свечением твердых тел под действием одного только электрического поля, рассматривают и явления, возникающие при одновременном или последовательном воздействии на люминофор электрического поля и какой-либо возбуждающей энергии (например, ультрафиолетовых, рентгеновских или катодных лучей). Электрическое поле может изменять свечение кристаллов, возбуждаемое другими видами энергии — гасить или усиливать его, ускорять или замедлять высвечивание запасенной энергии и т. д. Эти «эффекты поля» в кристаллофосфорах многообразны и еще мало изучены, тем не менее некоторые из них уже сейчас представляют большой практический интерес.

Ниже рассматриваются вопросы, связанные с основным направлением развития электролюминесцентной техники в данный период времени — созданием полупроводниковых приборов различного назначения на основе использования электролюминесценции, управляемой полем, и эффектов поля в кристаллофосфорах.

II. ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ, УПРАВЛЯЕМАЯ ПОЛЕМ

А. Элементарные электролюминесцирующие конденсаторы

Элементарный «светящийся конденсатор» представляет собой помещенный между двумя электродами слой диэлектрика, в котором равномерно распределены частицы электролюминесцирующего порошка. Хотя бы один из электродов должен быть прозрачным для излучения электролюминофора. В практических устройствах обычно используются твердые диэлектрики. Основные функции диэлектрика следующие: а) обеспечение высоких градиентов поля в межэлектродном пространстве, необходимых для возникновения свечения кристаллов и неосуществимых при наличии воздуха; б) максимальное концентрирование поля на электролюминесцирующих частицах за счет наиболее выгодного соотношения диэлектрических постоянных зерен порошка и диэлектрика; в) осуществление механического сцепления между подложкой и электролюминесцирующим слоем.

Если подложкой служит стекло, то прозрачным электродом могут быть проводящие пленки на стекле из двуокиси олова или титана, а также мелкоструктурные металлические сетки, изготавливаемые методом фотогравировки по тонким металлическим (серебро, медь и др.) слоям на стекле.

Диэлектриком в этом случае обычно служат органические синтетические смолы (меламиноформальдегидная, эпоксидная и др.), но можно использовать также и легкоплавкие стекла (глазури). Последние особенно приемлемы в случае металлических подложек, когда прозрачный электрод должен формироваться не на подложке, а на слое диэлектрика.

Можно готовить гибкие светящиеся конденсаторы, используя в качестве подложки проводящую ткань из стекловолокна или металлическую сетку.

Большое значение для массового производства как «жестких» так и «гибких» светящихся конденсаторов любого размера и конфигурации имело бы решение вопроса о получении прозрачных проводящих покрытий на различных пластмассах, способных выполнять и функцию подложки и функцию диэлектрика.

В качестве второго электрода конденсатора (за исключением ячеек с металлической подложкой) обычно используется металлическая пленка (чаще всего алюминия), напыляемая на слой диэлектрика в вакууме. Кроме хорошей проводимости и достаточно прочного сцепления со слоем, такая пленка должна иметь зеркальную поверхность со стороны слоя, чтобы обеспечить более полное использование светового потока, излучаемого слоем.

На рис. 1 схематично показаны некоторые конструкции элементарных светящихся конденсаторов, опробованные в нашей работе [9].

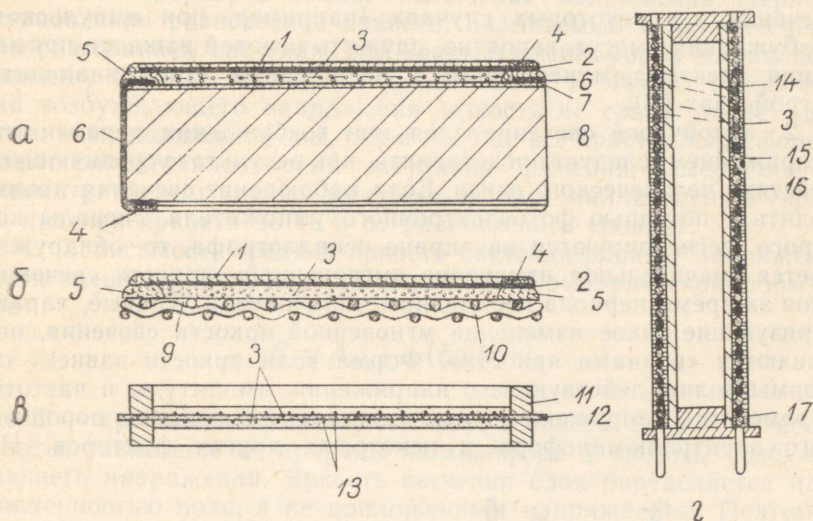


Рис. 1. Электролюминесцирующие конденсаторы (схематично):

а — на стекле, б — на металлической сетке, в — с двумя прозрачными электродами, г — провололочные на стеклянной трубке.

1 — защитная лаковая пленка; 2 — слой алюминия; 3 — слой люминофора в диэлектрике; 4 — контакт из бронзовой пудры; 5 — рамка из чистого диэлектрика; 6 — аквадаг; 7 — прозрачный проводящий слой; 8 — стекло; 9 — пленка диэлектрика; 10 — металлическая сетка; 11 — металлическая рамка; 12 — слюда; 13 — металлические нити; 14 — стеклянная трубка; 15 и 16 — эмалированные провода; 17 — цоколь.

Б. Некоторые свойства электролюминесцирующих слоев

1. Слои из большинства известных порошковых электролюминофоров практически не излучают света, когда на электроды подано постоянное напряжение. Кратковременная вспышка наблюдается только в момент снятия постоянного напряжения. Этот последний факт показывает, что постоянное напряжение определенной величины может возбудить зерна люминофора в слое. Однако образующиеся при возбуждении положительные

(ионизованные центры свечения) и отрицательные (свободные электроны) заряды в присутствии постоянного напряжения оказываются пространственно разделенными в каждом зерне электролюминофора и не могут рекомбинировать с излучением до тех пор, пока внешнее поле не будет удалено. Периодическое изменение внешнего поля при использовании для возбуждения слоя переменного напряжения создает условия возникновения устойчивого свечения за счет происходящих с той же последовательностью поляризации и деполяризации зерен люминофора в слое. Поляризационные эффекты при электролюминесценции кристаллов оказывают существенное влияние на характеристики свечения, а в некоторых случаях (например, при импульсном возбуждении) могут, вероятно, служить основой важного применения электролюминесценции в специальных «запоминающих» устройствах [10].

2. Устойчивое свечение слоя при возбуждении переменным напряжением следует представлять как результат усредняющего действия человеческого глаза. Если наблюдение свечения производить с помощью фотоэлектронного умножителя, сигналы которого регистрируются на экране осциллографа, то обнаруживается значительное изменение «мгновенной» яркости свечения слоя за время периода переменного напряжения. Кривые, характеризующие такое изменение мгновенной яркости свечения, называются «волнами яркости». Форма волн яркости зависит от формы волны действующего напряжения, амплитуды и частоты переменного напряжения, физико-химической природы порошкового электролюминофора и некоторых других факторов. На

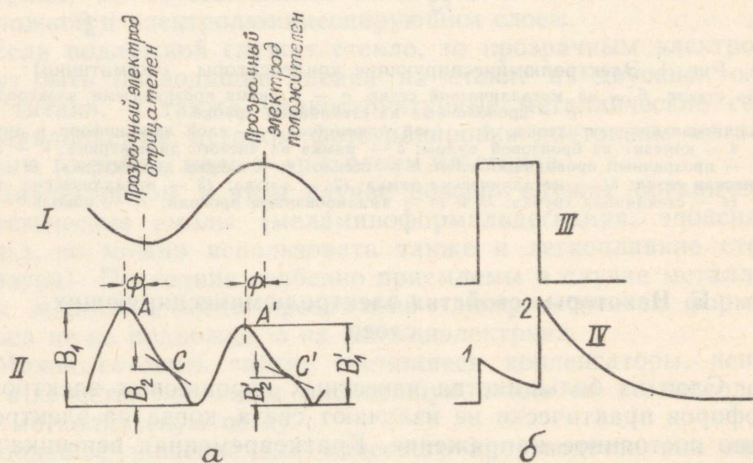


Рис. 2. Волны яркости (а) при возбуждении синусоидальным и (б) при возбуждении импульсным напряжением:

I — синусоидальная волна напряжения; *II* — волна яркости; *III* — импульс возбуждения; *IV* — световой импульс; 1 — передний пик, 2 — задний пик.

рис. 2 показаны формы волн яркости при синусоидальном и импульсном возбуждающем напряжении в установившемся режиме возбуждения. В случае синусоидального напряжения мгновенная яркость свечения переходит через нулевой уровень — волна яркости накладывается на некоторую постоянную составляющую яркости свечения, которая тем больше, чем выше частота переменного напряжения. Поэтому только при частотах, меньших 50 гц, глаз замечает мерцания свечения конденсатора.

3. Средняя равновесная яркость свечения, соответствующая данным условиям возбуждения, достигается при электролюминесценции не сразу в момент включения напряжения. Период установления равновесной яркости, называемый в люминесценции разгоранием свечения, для электролюминофоров составляет величину порядка миллисекунд или менее. В момент выключения возбуждающего напряжения яркость не сразу падает до нуля: электролюминофоры, как и вообще все кристаллофосфоры, имеют определенное время затухания свечения, измеряемое в рассматриваемом случае десятими долями миллисекунды (время падения яркости до 10% от равновесного уровня).

4. Зависимость средней яркости свечения слоя от напряженности внешнего поля хорошо выражается эмпирической формулой:

$$B = A_{\text{exp}} [-(E_0/E)^{1/2}],$$

где E — средняя напряженность поля в слое, а E_0 и A — константы, зависящие от природы люминофора и частоты возбуждающего напряжения. Яркость свечения слоя определяется напряженностью поля, а не приложенным напряжением. Поэтому в принципе можно изготавливать слои, удовлетворительно работающие при любом заданном напряжении за счет изменения толщины слоя. Практически, однако, нельзя изготовить слои тоньше 30—40 микрон, сохранив при этом их электрическую прочность, однородность свечения и среднюю яркость свечения. Затруднения в основном связаны с чисто технологическими факторами.

Доступные в настоящее время порошковые электролюминофоры обеспечивают получение при частотах около 20 кГц и напряжениях порядка 500 в средней яркости свечения слоя около 7000 нит (около 7000 миллистильб).

5. Яркость свечения слоя почти линейно возрастает с ростом частоты примерно до 20 кГц, а затем наступает насыщение. При частотах в несколько мегагерц яркость свечения начинает резко падать, а на сверхвысоких частотах никакого свечения не наблюдается.

6. На кривых зависимости светоотдачи от частоты или напряжения наблюдаются максимумы. Например, оптимум светоотдачи соответствует частоте около 500 гц. Поэтому выполнение

требования повышения яркости свечения сопровождается понижением эффективности работы электролюминесцирующего слоя. Электролюминофоры с различным цветом излучения имеют сильно отличающиеся светоотдачи. Наиболее эффективны «зеленые» фосфоры, светоотдача которых приближается к 10 лм/вт. До сих пор практически отсутствуют электролюминофоры с красным излучением, имеющие приемлемую для практики светоотдачу.

7. Большинство цинк-сульфидных электролюминофоров имеют спектры излучения, состоящие из двух или более полос. Это связано со сложной системой активаторов в кристаллах. Люминофоры с многополосным излучением могут менять цвет излучения при изменении условий возбуждения. В частности, для цинк-сульфидных электролюминофоров характерно изменение цвета излучения с изменением частоты возбуждающего переменного напряжения. С ростом частоты цвет излучения смещается в сторону более коротких длин волн. В принципе это свойство электролюминофоров может быть использовано для создания специальных цветных индикаторов частоты.

В. Электролюминесцентные устройства

1. Однослойные электролюминесцентные устройства типа описанных выше светящихся конденсаторов могут служить основой полупроводниковых источников света. Они отличались бы от ламп накаливания и люминесцентных ламп тем, что могут готовиться с большой равномерно светящейся поверхностью излучения и любой формы при толщине всего в несколько миллиметров. Из-за низкой светоотдачи электролюминофоров пока нельзя создать источники света такого типа, способные конкурировать не только с люминесцентными лампами, но и с лампами накаливания. Кроме того, применение таких источников света для целей общего освещения потребовало бы специальных преобразователей стандартного сетевого переменного напряжения в напряжение с частотой в несколько десятков килогерц и амплитудой в 400—500 в. В данный момент можно реально говорить лишь о применении электролюминесцентных источников света для таких целей, как маскировочное, декоративное и рекламное освещение, архитектурное оформление помещений, подсветка шкал приборов, приборных щитков, уличных знаков и т. п.

2. Применение электролюминесцентных устройств в электронике открывает новые, очень полезные возможности, и поэтому вопросы эффективности или создания специальных источников питания не могут служить существенным препятствием в попытках создать специальные приборы нового типа.

Предложено много устройств, основанных на простейшей конструкции светящегося конденсатора и предназначенных для различных целей индикации (индикаторы настройки радио, индика-

торы напряжения, индикаторы частоты, цифровые табло и т. п.). Наиболее интересными и революционизирующими являются возможности использования электролюминесценции в области устройств для преобразования различных сигналов в видимое изображение на плоском электролюминесцирующем экране. В принципе видимое изображение можно получить для электрических (телевизионных, радиолокационных и др.) и оптических (слабое видимое, инфракрасное или ультрафиолетовое изображение) сигналов, для жестких излучений (рентгеновские или гамма-лучи), для звуковых и ультразвуковых сигналов. Во всех случаях необходимо, чтобы в каждой точке электролюминесцирующего слоя действовало напряжение, соответствующее подающему в эту точку преобразуемому сигналу, т. е. чтобы на всем слое в каждый момент времени создавался потенциальный рельеф, соответствующий распределению интенсивности той или иной энергии в преобразуемом изображении. Этого можно достичь последовательным включением электролюминесцирующего слоя со слоем материала, изменяющего импеданс под действием поступающих сигналов и в соответствии с их интенсивностью. Такой материал будет осуществлять управление напряжением в данной точке электролюминесцирующего слоя в соответствии с поступающими сигналами. Примерами подобных материалов являются: для электрических сигналов — нелинейные сопротивления, для оптических и жестких излучений — различные фотопроводники, для звуковых и ультразвуковых колебаний — так называемые «полупроводники второго рода», и др.

В данный период времени много усилий направлено на разработку электролюминесцентных устройств для преобразования в видимое изображение оптических и жестких излучений, а также электрических сигналов. Такая разработка связана с преодолением целого ряда трудностей принципиального, конструктивного или технологического порядка, но в свете уже имеющихся данных можно надеяться на преодоление этих трудностей в недалеком будущем. Остановимся подробнее на этих двух типах преобразователей.

3. Преобразователь оптических излучений представляет собой двухслойный электролюминесцирующий конденсатор, между электродами которого последовательно нанесены слой электролюминофора в диэлектрике и слой фотопроводника (рис. 3).

Необходимость подбора наиболее выгодного соотношения темновых импедансов обоих слоев, соблюдения условий эффективного действия фотопроводника и создания наиболее простой конструкции прибора привела к решению задачи с помощью изготовления слоя фотопроводника из порошкового материала, скрепленного органическим биндером и выполненного в форме набора небольших трехгранных призм, уложенных боковой гранью на поверхность электролюминесцирующего слоя (рис. 4). Оба электрода конденсатора прозрачны, причем электрод со

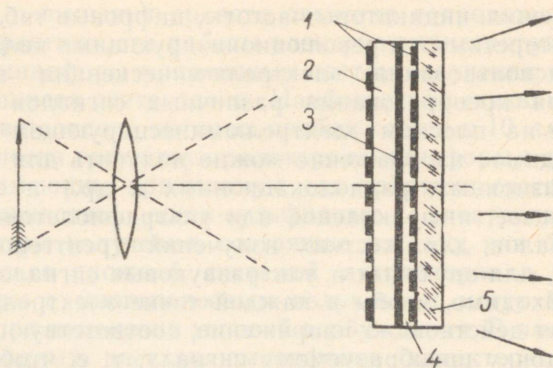


Рис. 3. Принципиальная схема многослойного электролюминесцентного усилителя изображения:

1 — электроды; 2 — фотопроводник; 3 — непрозрачный слой;
4 — электролюминофор в диэлектрике; 5 — стекло.

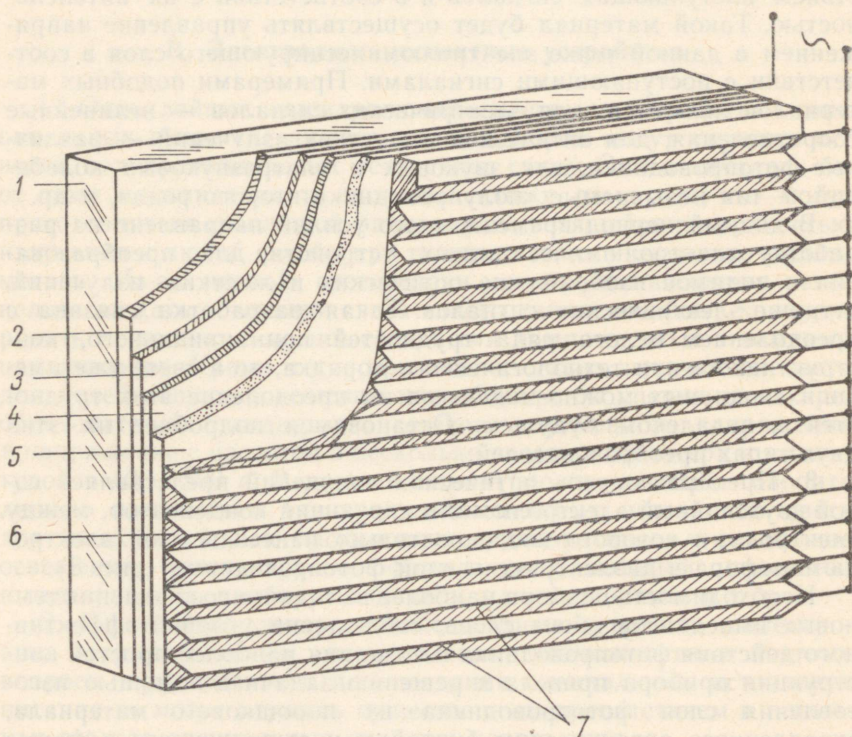


Рис. 4. Схема устройства усилителя изображения:

1 — стекло; 2 — прозрачный проводящий слой; 3 — электролюминофор; 4 — непрозрачный слой; 5 — токорассеивающий слой; 6 — фотопроводник; 7 — полоски из серебра.

стороны фотопроводника изготовлен не сплошным, а в виде узких проводящих полосок на вершинах призм, объединенных общим выводом. Подача переменного напряжения на электроды без освещения фотопроводника не приводит к свечению электролюминофора, т. к. импедансы слоев так подобраны, что в темноте все приложенное напряжение практически падает на слой фотопроводника. При проектировании преобразуемого изображения на слой фотопроводника сопротивление последнего падает (у некоторых материалов — в миллионы раз), и приложенное напряжение перераспределяется так, что электролюминофор светится. Поскольку изменение сопротивления в каждой точке фотопроводника пропорционально интенсивности освещения, то свечение электролюминофора в разных точках по яркости будет соответствовать распределению интенсивностей в проектируемом изображении. Вследствие высокой чувствительности фотопроводника и нелинейной зависимости яркости свечения электролюминофора от напряжения одновременно происходит усиление преобразуемого изображения — слабый сигнал на входе может управлять значительно большим световым потоком на выходе преобразователя. Имеются сведения о тысячекратном усилении светового потока в макетах описанного типа преобразователей [11]. Коэффициент усиления определяется не только характеристиками используемых материалов, но также параметрами действующего напряжения и освещенностью фотопроводника. Наибольшее усиление видимого изображения получено при использовании порошкового сульфида кадмия с различными добавками [12]. Этот же материал может использоваться для преобразования рентгеновского или гамма-излучения. Для преобразователей инфракрасных лучей можно применить селенид кадмия, сульфид, селенид или теллурид свинца.

Основной недостаток имеющихся сейчас высокочувствительных фотопроводников состоит в том, что времена нарастания и спада фототока в них слишком большие, чтобы позволить преобразовывать изображения движущихся объектов. Этот факт является в данное время основным препятствием в создании приборов описанного типа.

Совместное использование электролюминофора и фотопроводника, чувствительного к видимому излучению, позволяет создать приборы и другого типа. В преобразователе оптических изображений принимаются меры по ликвидации обратной оптической связи между электролюминофором и фотопроводником (см. рис. 3). Если же такую связь, наоборот, использовать, то при должном подборе параметров действующего напряжения и при соответствующем конструктивном оформлении устройства можно осуществить сколь угодно длительное «сохранение» однажды поступившего короткого светового сигнала в любом элементе преобразователя. Такие «запоминающие» устройства могут иметь важное значение для различных целей автоматики.

Как и в преобразователях излучения, характеристики инерционности фотопроводников имеют существенное значение для работы запоминающего устройства.

4. Экраны типа телевизионных позволяют преобразовать электрические сигналы, поступающие в определенной временной последовательности по единственному каналу, в двухмерное изображение. Распределение поступающих сигналов по площади экрана осуществляется специальными системами «разверток». В случае электронно-лучевых трубок задача формирования изображения на экране решается модулированием тока в пучке электронов и отклонением этого пучка в двух взаимно-перпендикулярных направлениях. Катодолуминесцирующий слой при этом сплошной, а элементы изображения формируются самим пучком. В случае электролюминесцирующих экранов такого же назначения элементы изображения должны быть физически выделены в экране, т. е. экран должен состоять из такого числа элементарных конденсаторов, которое равно числу элементов в принимаемом изображении. В телевидении это число может достигать миллиона. Как и в электронно-лучевой трубке, люминесцирующий слой здесь может быть сплошным, а элементы должны выделяться формой электродов, т. е. каждый электрод конденсатора должен состоять из кусочков правильной формы, изолированных друг от друга и по числу соответствующих числу элементов экрана. Нетрудно осуществить такую форму электродов экрана, например, методом фотогравировки по тонким металлическим пленкам. Однако практически невыполнимой кажется задача подсоединения каждого элемента такого экрана к питающему и коммутирующему устройству (два миллиона выводов). Сразу же возникает задача значительного сокращения

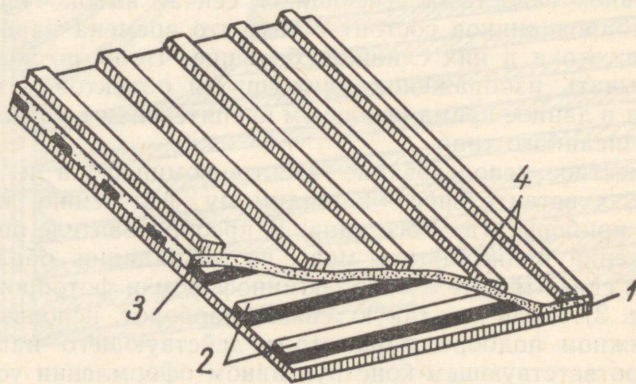


Рис. 5. Схематическое изображение многоэлементного матричного экрана:

1 — прозрачная подложка; 2 — полосы первого электрода; 3 — слой электролюминофора в диэлектрике; 4 — полосы второго электрода.

числа выводов с экрана при сохранении в нем нужного числа элементов. Один из возможных путей такого сокращения, так называемая «матричная система» выводов, показан на рис. 5. Каждый электрод экрана выполняется в форме параллельных изолированных друг от друга полосок, причем направления полосок двух электродов взаимно-перпендикулярны. Система полосок одного электрода позволяет выбирать элементы по оси x , а другого — по оси y . Если на полосу одного электрода подать импульс амплитуды $(+U)$, а на полосу другого электрода — импульс амплитуды $(-U)$, то в месте их перекрестия (на выбранном элементе изображения) будет действовать напряжение $2U$. Из-за наличия емкостных связей между всеми полосками экрана в тот момент, когда на выбранном элементе приложено напряжение $2U$, на всех остальных элементах, расположенных под обеими выбранными полосками, будет действовать напряжение U . Такое распределение напряжений по элементам экрана не вызвало бы осложнений, если бы амплитудно-яркостная характеристика электролюминесцирующего слоя имела резко выраженный порог по напряжению (см. рис. 6). Отсутствие порога в реальной характеристике слоя приводит к одной из основных проблем создания матричного электролюминесцентного экрана — проблема контрастности изображения. Паразитная засветка элементов в матричном экране оказывается настолько большой, что без специальных мер описанная конструкция устройства непригодна для практических целей. Проблема кон-

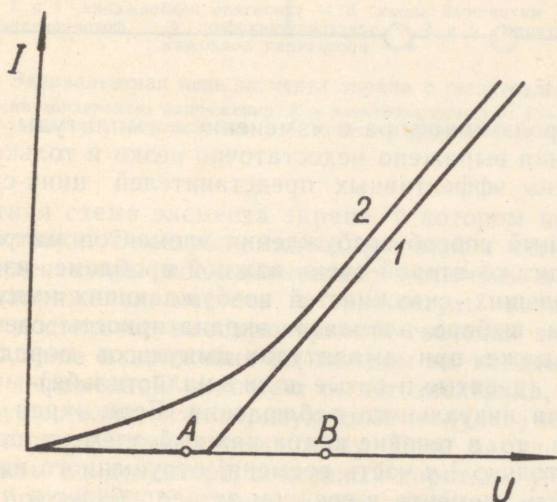


Рис. 6. Амплитудно-яркостные характеристики электролюминофора:

I — необходимая для работы экрана и 2 — реальная. (I — световой поток в относительных единицах; U — напряжение на электролюминофоре). Точка A — амплитуда одинарного поля, точка B — амплитуда двойного поля.

трастности изображения принципиально решается использованием нелинейных сопротивлений, последовательно соединяемых с электролюминесцентными элементами [13], или комбинированием экрана из люминофора, меняющего цвет излучения в зависимости от величины приложенного напряжения, с усилителем света (рис. 7), фотопроводник которого чувствителен только к излучению в одной из полос фосфора [14]. Осуществление таких решений на практике пока затруднено из-за отсутствия материалов с необходимыми свойствами. Так, нелинейные сопротивления из порошкового сульфида кадмия не обладают пока необходимой стабильностью характеристик, фотопроводники имеют слишком большие времена релаксации, а изменение цвета излу-

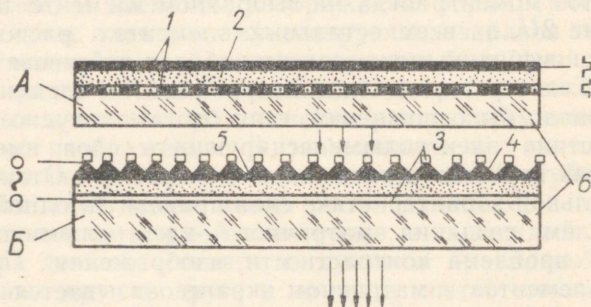


Рис. 7. Принципиальная схема многоэлементного устройства с повышенной контрастностью изображения:
 А — матричный экран, Б — усилитель изображения. 1 и 3 — электроды; 2 и 5 — электролюминофор; 4 — фотопроводник; 6 — прозрачная подложка.

чения электролюминофора с изменением амплитуды переменного напряжения выражено недостаточно резко и только у отдельных не очень эффективных представителей цинк-сульфидных фосфоров.

Импульсный способ возбуждения элементов матричного экрана приводит ко второй очень важной проблеме: из-за необходимости больших скважностей возбуждающих импульсов при поочередном выборе элементов экрана яркость свечения этих элементов, даже при амплитудах импульсов порядка 800 в, очень мала (десятые и сотые доли миллистильба) и экран непригоден для визуального наблюдения. Если экран состоит из n элементов, то в течение кадра каждый элемент полезно возбуждается только $1/n$ часть времени, отпущенного на кадр. Поэтому яркость элемента в среднем за кадр будет в n раз меньше яркости, которая имела бы при возбуждении элемента в течение всего кадра.

Для достижения яркостей, приемлемых для визуального наблюдения, необходимы специальные средства «накопления»

информации, т. е. сохранения действия короткого сигнала на период всего кадра с мгновенным стиранием этого действия в конце кадра, чтобы избежать искажения новой информации на элементе. Если бы имелись фотопроводники с высокой чувствительностью и достаточно малой инерционностью, то они могли бы служить в экране средством такого накопления за счет частичного использования обратной оптической связи между электролюминофором и фотопроводником [14]. Наиболее перспективным решением проблем электролюминесцирующего экрана является, повидимому, использование сегнетоэлектриков [15] или ферритов [16] в качестве элементов, управляющих яркостью свечения электролюминофора. На рис. 8 показана

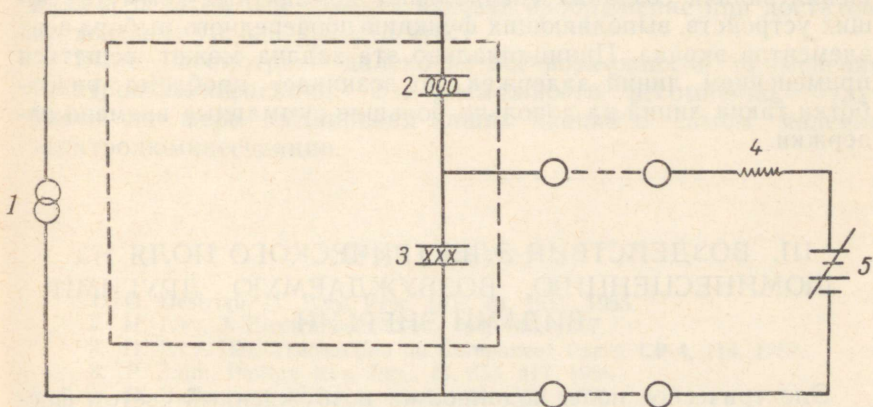


Рис. 8. Эквивалентная цепь элемента экрана с сегнетоэлектриком:

1 — источник синусоидального напряжения; 2 — электролюминофор; 3 — сегнетоэлектрик; 4 — разделяющее сопротивление; 5 — источник управляющих импульсов.

эквивалентная схема элемента экрана, в котором используются сегнетоэлектрики. Электролюминесцирующий и сегнетоэлектрический конденсаторы последовательно включены в цепь переменного напряжения, частота и амплитуды которого могут обеспечить достаточно высокую яркость свечения электролюминофора. Падение напряжения на каждом из конденсаторов регулируется переменной емкостью сегнетоэлектрика, управление которой осуществляется поляризующими импульсами, по амплитуде соответствующими видеосигналу. Если заряд на сегнетоэлектрическом конденсаторе, созданный коротким управляющим импульсом, сохранять в течение всего кадра, то на электролюминофоре непрерывно будет приложено синусоидальное напряжение заданной частоты и амплитуды, изменяющейся в соответствии с видеосигналом. Яркость свечения элемента может быть очень большой. Как и в простой матричной конструкции

экрана, экран с сегнетоэлектриком требует решения проблемы контрастности изображения. Это решение может и здесь основываться на применении нелинейного сопротивления. Что же касается потенциальной возможности осуществления накопления с помощью сегнетоэлектрика, то реализация ее также требует каких-то специальных средств (ключей, размыкающих управляющую цепь сегнетоэлектриков после зарядки его поляризирующим импульсом). Возникает также ряд проблем при разработке конструкции экрана с сегнетоэлектриками, которая должна учитывать как свойства применяемых материалов, так и возможности известных технологических приемов.

Значительные трудности возникают в любой конструкции многоэлементного электролюминесцирующего экрана при решении задачи создания специальных компактных коммутирующих устройств, выполняющих функцию поочередного выбора всех элементов экрана. Принципиально эта задача может решаться применением линий задержек, но возникает проблема разработки таких линий на довольно большие суммарные времена задержки.

III. ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЮ, ВОЗБУЖДАЕМУЮ ДРУГИМИ ВИДАМИ ЭНЕРГИИ

Электрическое поле, поданное на возбужденный светом фосфор в период послесвечения, вызывает ускоренное высвечивание запасенной в фотолюминофоре энергии, т. е. в момент подачи поля возникает вспышка в заранее возбужденном фосфоре (эффект Гуддена-Поля). Эффект может быть использован для создания специальных запоминающих устройств.

В некоторых порошковых фосфорах цинк-сульфидного типа наблюдается усиление рентгенолюминесценции, если одновременно с облучением рентгеновскими лучами на фосфор накладывается электрическое поле. Усиление не превышает 20—30%. В сублимированных (пленочных) фосфорах под действием поля усиливается не только рентгенолюминесценция, но и свечение, возбуждаемое ультрафиолетовыми лучами. На этом явлении основаны однослойные усилители Кузано. Хотя коэффициент усиления достигает 100, усилители подобного типа пока не могут иметь большого практического значения, т. к. цинк-сульфидные фосфоры, обладающие эффектом усиления фото- и рентгенолюминесценции, имеют очень низкие яркости свечения при возбуждении рентгеновскими или ультрафиолетовыми лучами. Подобное же усиление полем обнаружено и для люминесценции, возбуждаемой катодными лучами или α -частицами [2].

Электрическое поле создает в некоторых люминесцирующих материалах «память» к действию рентгеновских лучей (эффект Дестрио). Если экран облучается слабым потоком рентгеновских лучей через исследуемый объект, причем на экран одновременно подано напряжение, то оказывается, что полученное изображение накапливается в экране (в темноте оно может сохраняться до 17 часов) и его можно затем «проявить» более интенсивным потоком рентгеновских лучей без создания на экране электрического поля и в отсутствии исследуемого объекта. Проявленное изображение некоторое время будет более ярким, чем светящийся фон за счет нового облучения, а затем свечение на экране выравнивается. Этот эффект позволяет понизить дозу рентгеновского облучения объекта в период накопления изображения, а затем без объекта изучать изображение при достаточно высоком уровне яркости его.

Выше рассмотрены далеко не все возможности применения электролюминесценции. Эти возможности, несомненно, будут расти по мере расширения наших знаний о самом явлении электролюминесценции.

ЛИТЕРАТУРА

1. G. Destriau, H. Ivey, Proc. IRE, **43**, 1911, 1955.
2. H. Ivey, J. Electrochem. Soc., **104**, 740, 1957.
3. H. Ivey, IRE Transaction on Component Parts, **CP-4**, 114, 1957.
4. P. Zalm, Philips Res. Rep., **11**, 353, 417, 1956.
5. D. Ballentyne, Wireless World, **63**, 128, 1957.
6. J. Bowtell, J. IEE, **3**, 454, 1957.
7. F. Matossi, Elektrolumineszenz und Elektrophotolumineszenz, 1957.
8. И. Н. Орлов, И. Я. Лямичев, Труды НИИ МРТП, вып. 9, 1957 г.
9. И. Н. Орлов, Изв. АН СССР, сер. физич., **21**, 731, 1957.
10. И. Я. Лямичев, Научно-технич. сб. «Электроника» НИИ ГКРЭ, СМ СССР, № 1, 1959.
11. B. Kazan, Proc. IRE, **45**, 1358, 1957.
12. И. Н. Орлов, В. П. Поручиков, Научно-технич. сб. «Электротехника» НИИ ГКРЭ СМ СССР, № 1, 42, 1959.
13. И. Я. Лямичев, И. Н. Орлов, В. П. Поручиков, «Техника кино и телевидения», № 11, 1957.
14. И. Я. Лямичев, И. Н. Орлов, Научно-технич. сб. «Электроника» НИИ ГКРЭ СМ СССР, № 2, 101, 1959.
15. E. Sack, IRE National Convention Record, part 3, Electron Devices, **31**, 1958.
16. J. Rajchman, G. Briggs, A. Lo, Proc. IRE, **46**, 1808, 1958.

ЛЮМИНЕСЦЕНТНАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ В МАШИНО- СТРОИТЕЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ, СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ И МЕДИЦИНЕ

А. В. КАРЯКИН

Люминесцентная дефектоскопия является одним из основных направлений люминесцентного анализа и имеет целью выявление каких-либо пороков объекта по цветному контрасту свечения.

Люминесцентная дефектоскопия за последние годы все шире применяется в различных отраслях народного хозяйства вследствие исключительно высокой чувствительности ее, а также из-за невозможности проведения контроля другими методами анализа.

Массовый выпуск продукции машиностроительной промышленностью при поточном методе ее изготовления потребовал более тщательного контроля деталей без разрушения образца. Просвечивание рентгеновскими и гамма-лучами, а также магнитный, ультразвуковой и некоторые другие методы дефектоскопии, позволяют выявлять внутренние дефекты в деталях, изготовленных из различных материалов, а поверхностные дефекты — только на ферромагнитных материалах. Рентгеновские и гамма-лучи, обладающие большой проникающей способностью, применяются при просвечивании различных металлов для определения внутренних макроскопических дефектов литья и сварки — трещин, раковин, включений, непроваров, рыхлости и т. д. Все эти дефекты выявляются благодаря различному поглощению лучей целым и дефектным участками металла, что фиксируется на фоточувствительном материале или на специальном экране. Рентгеновская дефектоскопия позволяет надежно контролировать сталь до 60 мм толщиной, а гамма-дефектоскопия — до 300 мм.

Наличие внутренних дефектов в металле можно определять также по изменению интенсивности ультразвуковых колебаний, прошедших через контролируемую деталь, или по различию интенсивности отраженных лучей, которые регистрируются специальным приемником. При отражении от внутренних дефектов ультразвук сильно ослабляется.

С помощью ультразвуковой дефектоскопии можно определять в различных металлических изделиях не только наличие внутренних дефектов, но и глубину их расположения (до одного метра). Контроль же на наличие поверхностных дефектов, главным образом трещин, в современном материаловедении производится всего лишь одним физическим методом, а именно — порошковой магнитной дефектоскопией. Этот метод основан, как известно, на возбуждении в контролируемой детали магнитного потока и образовании рассеянных магнитных потоков на поверхности детали в местах расположения дефектов. Окислы железа (крокус), предварительно переведенные в магнитную модификацию, осаждаются на поверхности детали в местах рассеяния магнитных потоков, давая четкие рисунки осаждения. Однако указанными методами дефектоскопии невозможно выявить скрытые поверхностные дефекты на деталях, изготовленных из цветных металлов, сплавов, пластмассы, керамики, сталей аустенитного класса, твердых сплавов и ряда других материалов, нашедших широкое применение в современном машиностроении и, главным образом, в авиационной и автомобильной промышленности. Нужно отметить, что большинство поломок происходит в результате наличия незначительных дефектов, главным образом трещин, не видимых невооруженным глазом, на концах которых во время эксплуатации концентрируются большие напряжения. Если же дефектная деталь испытывает, кроме того, толчки и вибрацию, то поломка произойдет еще раньше.

Для выявления скрытых поверхностных трещин, раковин, пор и расслоений, выходящих на поверхность, уже давно применяется «керосиново-меловой метод». Проверяемая поверхность смачивается керосином, который проникает в дефекты, а затем, после удаления керосина, покрывается мелом. Керосин, выделяющийся из дефектов, смачивает мел, образуя темные пятна в районе дефектов. Однако различие между участками сухого и смоченного мела невелико, и метод недостаточно чувствителен. Применение красителей повышает чувствительность и точность определения геометрических размеров дефектов. Этот улучшенный метод нашел широкое применение в машиностроительной промышленности. Чувствительность метода еще больше повышается при замене красителей люминесцирующими веществами и рассматривании деталей в ультрафиолетовом свете. Последний метод (люминесцентный) на два порядка чувствительнее простого керосиново-мелового метода и на один порядок чувствительнее метода с применением красителей. Это обстоятельство обусловлено тем, что контрастность свечения флуоресцирующего раствора, обычно желто-зеленого света, на темно-фиолетовом фоне поверхности детали значительно выше, чем контрастность окрашенного и неокрашенного мела или каолина.

Применение люминесцирующих веществ позволило увеличить чувствительность и магнитной дефектоскопии, что особенно

важно при контроле черных поверхностей. Метод магнитного контроля не изменяется, но осмотр деталей производится под ультрафиолетовыми лучами, что дает значительный оптический эффект по сравнению с визуальным осмотром даже при применении красной пасты.¹

Люминесцентный метод дефектоскопии позволяет с помощью флуоресцирующих растворов обнаруживать невидимые невооруженным глазом поверхностные дефекты, определять их местоположение и протяженность. Сущность метода заключается в том, что на контролируемую поверхность детали наносят флуоресцирующую жидкость, хорошо проникающую во все дефекты поверхности; после удаления с детали избытка жидкости наличие дефектов устанавливается по интенсивному свечению раствора, вышедшему из них на поверхность детали, при освещении ультрафиолетовыми лучами [1].

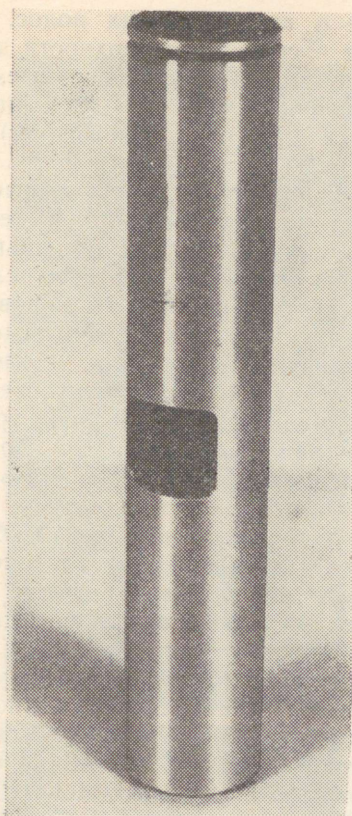
В качестве флуоресцирующих жидкостей рекомендуются: а) керосиново-масляный раствор с флуоресцирующим красителем — дефектолом зелено-золотистым, и б) керосиновый раствор нориола, который представляет собой концентрат углеводородов, обладающих желто-зеленым свечением.

Удаление излишков флуоресцирующего раствора с поверхности детали можно производить несколькими способами: а) смыванием сильной струей воды; б) смыванием проточной водой, но уже в присутствии поверхностно-активных веществ во флуоресцирующей смеси; в) удалением путем распыления малого количества воды сжатым воздухом под давлением от 1,5 до 2,5 атмосфер; г) протиранием ветошью, смоченной бензином. В последнем случае выявление микродефектов ухудшается.

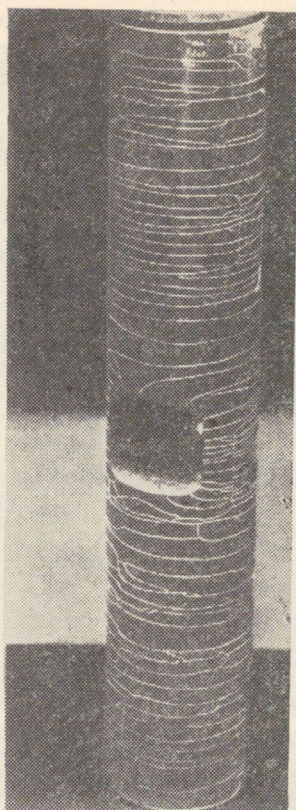
Для усиления выхода флуоресцирующего раствора из дефектов на поверхность детали последняя посыпается слоем тонкоизмельченного сухого порошкообразного вещества, обладающего сильными адсорбирующими свойствами, каким является, например, силикагель. Время выдержки на воздухе зависит от характера и глубины трещин и колеблется от 1 до 30 минут. Силикагель, пропитанный раствором, связывается с поверхностью детали достаточно прочно и при стряхивании не удаляется, в то время как излишки сухого силикагеля можно удалить стряхиванием или сдуванием.

Освещение фильтрованным ультрафиолетовым светом обработанной таким образом детали дает световую картину расположения трещин на темной поверхности детали благодаря яркому желто-зеленому или зелено-голубому свечению раствора, вышедшего на поверхность из его дефектов. Глубокие трещины

¹ Вышеуказанные методы — визуальные. Применение радиоактивных веществ (например, радиоактивного цезия в спирте), дающих «след» на фотографическом слое, позволяет получать «радиоавтограф» местоположения и протяженности поверхностных дефектов. Чувствительность этого метода примерно такая же, как у люминесцентного.



а



б

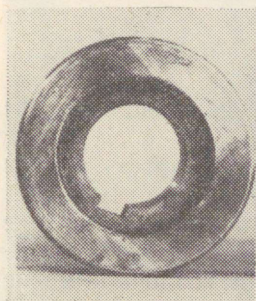


Рис. 1. Валик и муфта:

а — при обычном освещении; б — при освещении ультрафиолетовым светом (видна сетка шлифовочных трещин).

типа закалочных дают свечение в виде широких полос, и это свечение появляется сразу после посыпания поверхности детали силикагелем. Мелкие трещины, в частности, шлифовочные, дают тонкие светящиеся линии или рисунки, причем свечение появляется не сразу, а через некоторое время (от 1 до 30 минут) и зависит от глубины трещин (см. рис. 1).

Для выявления трещин различной глубины необходимо применять силикагель определенной марки с различной степенью размельчения. Так, например, силикагель МСМ со степенью размельчения 270 *mesh* (размер частичек менее 0,053 мм) следует рекомендовать для выявления микротрещин типа шлифовочных и других микродефектов вне зависимости от механической обработки поверхности. Для выявления трещин типа закалочных, усадочных и эксплуатационных следует применять тот же силикагель, но с другой степенью размельчения — 200 *mesh* (размер частичек 0,074 мм). При комбинированном определении различных по глубине поверхностных дефектов нужно применять смесь (1 : 1) вышеуказанных размельчений силикагеля МСМ.

Для выявления поверхностных дефектов и, главным образом микротрещин, большую роль играет интенсивность ультрафиолетового света. Интенсивность ультрафиолетового света может быть малой — порядка 110 «черных» люксов, для определения закалочных, усадочных и других глубоких трещин, в то время как для более мелких трещин глубиной от 0,05 до 0,01 мм необходимо увеличить интенсивность в два раза. Для надежного выявления трещин глубиной от 0,005 до 0,003 мм требуется довести интенсивность ультрафиолетового света до 700—800 «черных» люксов. Для выявления микротрещин порядка 0,002—0,001 мм необходима интенсивность 1000—1200 «черных» люксов (такую освещенность дает ртутно-кварцевая лампа сверхвысокого давления СВДШ-250 на расстоянии 25 см без применения какой-либо оптики).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛУБИНЫ ТРЕЩИН

Люминесцентный метод дефектоскопии позволяет достаточно точно определять глубину трещин по ширине флуоресцирующей полосы и времени появления (времени выявления) свечения [2] — см. таблицу 1. Размеры глубоких трещин могут быть определены только приблизительно. Впрочем, на практике точно определять глубину таких трещин нет необходимости, т. к. сам факт наличия глубокой закалочной или усадочной трещины на изделии позволяет с достаточным основанием забраковать такое изделие.

При глубине трещин меньше 0,015 мм данные таблицы могут служить практическим руководством для определения глубины трещин как по величине ширины флуоресцирующей по-

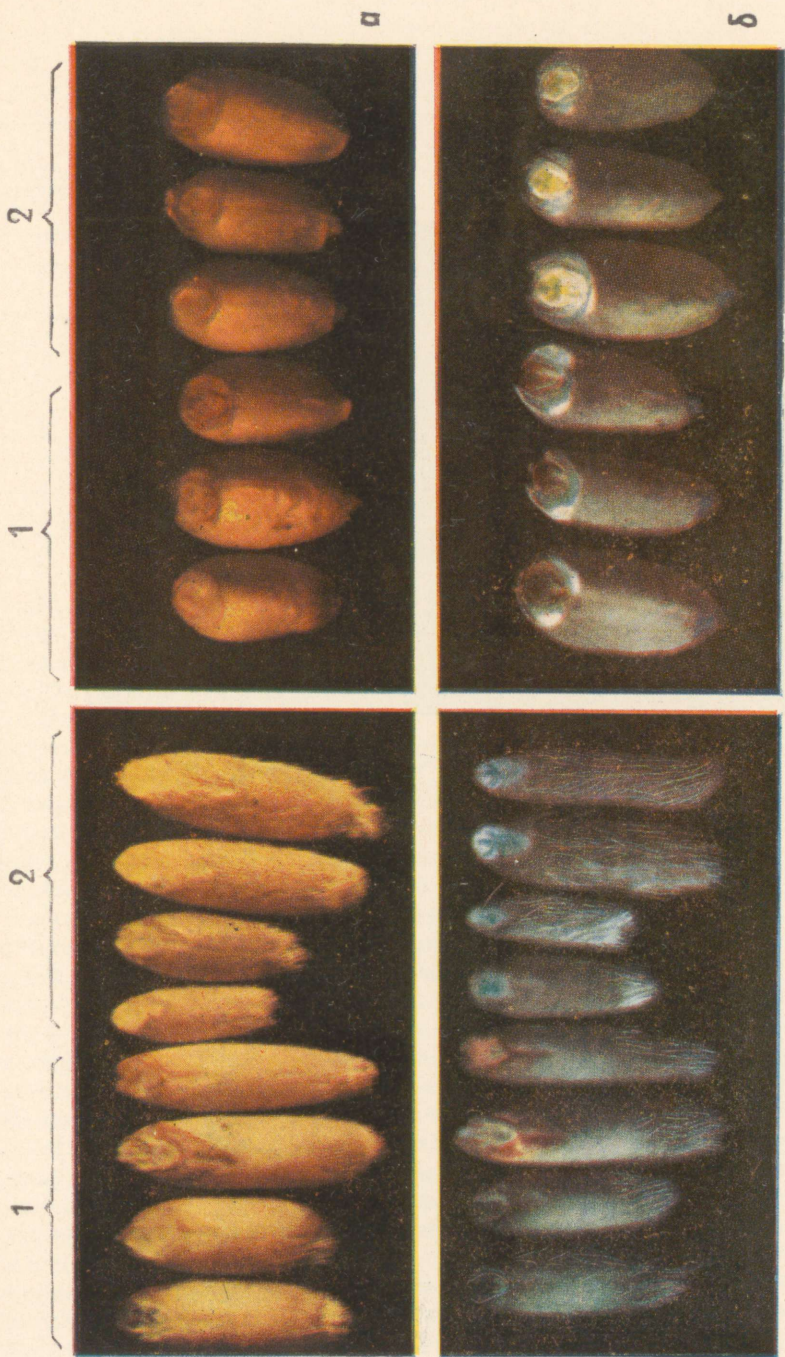


Рис. 2. Семена овса и пшеницы:

а — при обычном освещении; *б* — при освещении ультрафиолетовым светом; *1* — не жизнеспособные семена; *2* — жизнеспособные семена.



Рис. 4. Люминесценция легкого, пораженного раком
(желто-коричневое свечение).

Связь между временем выявления свечения, шириной
флуоресцирующей полосы и глубиной трещины

Время выявления свечения (мин)	Ширина флуорес- цирующей полосы (мм)	Глубина тре- щин (мм)	Характер трещин
Менее 0,5	0,70—0,50	Более 0,100	Закалочные трещины
0,5—1	0,40—0,30	0,050—0,025	
1—2	0,30—0,20	0,025—0,015	
2—3	0,17—0,14	0,015—0,013	
3—4	0,14—0,10	0,013—0,010	
4—5	0,10—0,08	0,010—0,008	
6—8	0,08—0,06	0,008—0,006	Шлифовочные трещины
8—10	0,06—0,04	0,006—0,004	
10—12	0,04—0,03	0,004—0,003	
12—15	0,03—0,02	0,003—0,002	
15—20	0,02—0,01	0,002—0,001	
20—30	Около 0,01	Менее 0,001	

лосы, так и по времени выявления, причем последнюю величину очень легко измерить — это время, протекшее от момента посыпания изделия силикагелем до возникновения заметной флуоресценции.

Достаточно точное определение величины глубины для шлифовочных трещин весьма важно, поэтому на первом же этапе организации производственного контроля необходимо создать обоснованные нормы разбраковки изделий путем проведения стойкостных испытаний с целью определения допустимой для данного вида изделий глубины трещин. Проводить такие испытания необходимо особенно тщательно.

Люминесцентный метод дефектоскопии за последние годы нашел широкое применение в металлообрабатывающей промышленности для выявления трещин и пор в различных деталях машин и инструментах, причем не только с целью разбраковки, но и для корректировки технологического процесса их изготовления. В результате последнего мероприятия удастся почти полностью устранить брак и в первую очередь для инструмента из твердого сплава (с 20% до 0,5%).

В сельском хозяйстве с помощью люминесценции можно производить не только сортовой анализ семян, но и довольно четко определять качество корнеплодов и плодов, т. е. их зараженность различными болезнями, пораженность грибом, плесенью, а также подморозку. Это дает возможность своевременно обнаружить начало гниения на такой ранней стадии, когда оно неуловимо при визуальном осмотре, и производить необходимую сортировку с целью увеличения срока хранения

продукта. Так, например, в картофеле очень отчетливо выявляется некроз тканей, вызванный болезнями, по яркому голубому свечению в пораженных местах, подморозку — по кольцевому белесоватому свечению, а кольцевую гниль — по зеленоватому свечению, в то время как срез клубня имеет свечение от ярко-желтого до серовато-коричневого в зависимости от сорта.

Как показали проведенные опыты, срезы зародышей некоторых семян светятся в ультрафиолетовом свете и притом по-разному у семян различной степени жизнеспособности [3]. Так, например, ярко-голубое свечение зародышей семян овса и кукурузы соответствует их хорошей жизнеспособности, а свечение желтое, оранжевое или черно-бурое указывает на их нежизнеспособность. Однако не все семена (например, семена пшеницы) имеют контрастное свечение зародышей, позволяющее определить их жизнеспособность. Увеличению контраста способствует прокрашивание срезов зародышей флуорохромами. Диметилнафтеиродин дает свечение яркое светло-желтое для жизнеспособных зародышей и тусклое розовато-оранжевое — для нежизнеспособных (см. рис. 2). Данная контрастность свечений улавливается без труда невооруженным глазом. Средний процент жизнеспособности семян, определенный люминесцентным методом, хорошо совпадает со средним процентом жизнеспособности, полученным методом проращивания.

Люминесцентная дефектоскопия может применяться и в медицине.

Было отмечено, что патологические явления отражаются на свечении, и поэтому по люминесценции можно оценивать общее состояние данного органа, тканей и даже всего организма (зеленая флуоресценция волос при микроспории, оранжевое свечение зубов при их кариесе, темно-бурое свечение желчных пигментов при желтухе и т. д.). Однако не всегда наблюдается большой цветовой контраст при патологических изменениях.

Для целей увеличения интенсивности свечения и его контрастности применяется окрашивание тканей флуоресцирующими красителями. Было установлено, что красители значительно дольше задерживаются в крови, а в лимфу переходит только 1/30—1/50 часть. Наибольшее количество красителей накапливается и удерживается в очагах воспаления и в тканях новообразования. По флуоресценции введенных красителей, лекарственных веществ (хинин, акрихин, пенициллин и др.) и антибиотиков можно наблюдать за их перемещением и локализацией, устанавливать скорость циркуляции крови, пути удаления веществ из кровеносных сосудов, устанавливать начало кровообращения между пересаженной кожей и остальными тканями и т. д.

Если в биологическом микроскопе использовать вместо обычного освещения ультрафиолетовое, то можно видеть различное свечение микрообъектов и установить различные новые детали

их строения, незаметные при обычном освещении, а также значительно быстрее производить диагностику различных заболеваний. При применении флуоресцирующих красителей вследствие их различной адсорбции создается многоцветная световая картина микрообъекта. В частности, необходимо указать на успешное применение люминесцентной микроскопии в экспериментальной онкологии, где она позволила открыть канцерогенные углеводороды, изучить некоторые вопросы механизма действия канцерогенных веществ. Однако клиническая диагностика злокачественных опухолей методом микролюминесценции не получила еще в настоящее время достаточного развития, и в литературе имеются лишь отдельные работы, где делаются попытки разработать вопросы цитологической диагностики злокачественных опухолей методом люминесцентной микроскопии. Метод люминесцентной микроскопии по сравнению с обычными громоздкими и длительными гистологическими методами окраски препаратов является как нельзя более подходящим для цитологического исследования благодаря простоте, максимальному сокращению времени исследования, а также благодаря высокой своей чувствительности. Все это позволяет значительно ускорить постановку микроскопического диагноза.

Макролюминесцентная диагностика рака до сих пор используется явно не достаточно. Производилось наблюдение свечения раковых опухолей и здоровых тканей как без применения флуорохромов, так и при применении их. В качестве последних применялись флуоресцеин, конго красный, порфирины и т. д. Однако же эти данные по флуоресценции раковых опухолей и, в особенности, по первичной люминесценции исключительно разноречивы и не могли быть использованы в диагностических целях, хотя указывалось о возможности определения границ опухоли. Нам кажется, что такое положение связано с применением ультрафиолетового света неодинаковой интенсивности у различных исследователей.

Следовательно, до сих пор не был предложен люминесцентный метод в макроscopicческой диагностике опухолей и их метастазов в условиях клиник, в частности, на операционном столе. Возможность же определения границ распространения ракового процесса и, главным образом, локализации метастазов, для хирурга-онколога крайне необходима.

Гладковой было проведено исследование, которое показало, что можно по вторичной люминесценции (флуорохром — флуоресцеин) установить визуально границы распространения экспериментальной опухоли легкого и диагностировать ее метастазы [4].

С 1957—1958 г. в Институте грудной хирургии АМН СССР (Лушниковым, Гладковой и Карякиным) было проведено исследование, целью которого была разработка люминесцентного метода диагностики рака легкого во время операции. Был сконструирован и построен ультрафиолетовый осветитель с ртутно-

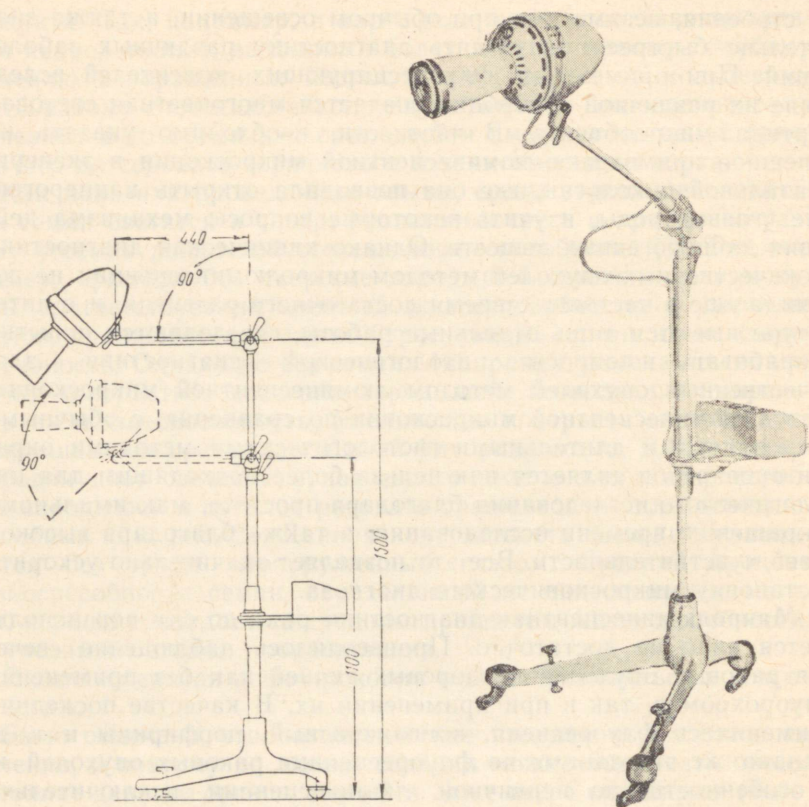


Рис. 3. Ультрафиолетовый осветитель — медицинский люминескоп КР-1МЛ.

кварцевой лампой сверхвысокого давления СВДШ-250 и стеклянным ультрафиолетовым светофильтром УФС-4, имеющим максимум пропускания в области 360 мμ (рис. 3). Как экспериментально, так и в условиях клиники было установлено, что раковая опухоль легкого и желудка имеет своеобразное свечение по сравнению с окружающими тканями. Первичная люминесценция непораженной ткани — голубовато-серая, а раковой опухоли — от серого до красновато-фиолетового цвета при большой интенсивности ультрафиолетового света. Если облучение производить ультрафиолетовым светом малой интенсивности, то свечение раковой опухоли будет малоразлично по сравнению со свечением окружающих тканей. При применении флуоресцина было установлено, что он задерживается в опухоли более длительное время, чем в других тканях и в органах; так, через

4 часа после введения флуоресцеина в организм он задерживается только в опухоли легкого или в расширенных лимфатических сосудах при лимфостазе. В результате этого наблюдается контрастность свечения. Опухоли дают желто-коричневое свечение, неизменная легочная ткань — голубовато-серое (см. рис. 4), клетчатка средостения при выраженном лимфостазе, плевральные шварты дают ярко-желтое свечение. При отсутствии лимфостаза медиастинальная и париетальная плевро дают голубоватое свечение. Лимфатические узлы при поражении их метастазами с прорастанием капсулы дают ярко-желтое свечение. Эти данные облегчают хирургу наметить правильный план операции и провести ее радикально.

В ряде случаев люминесценция тканей позволяет устанавливать во время операции границы распространения ракового процесса. Наибольшая четкость в определении границ пораженности легочных тканей наблюдается при периферическом раке.

Небольшое количество проведенных исследований при раке пищевода и желудка указывают на большую перспективность данного метода диагностики. Однако вышеуказанный метод диагностики рака требует усовершенствования и уточнения, прежде чем его рекомендовать для широкого внедрения в клиническую практику.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. В. Карякин, Л. С. Лаврентьев, Заводская лаборатория, 17, 559, 1951; Информ. техн. листок ЛДНТП, № 41, 1951.
2. А. В. Карякин, В. А. Никитин, Изв. АН СССР, сер. физич., 15, 767, 1951; Заводская лаборатория, 18, 192, 1952; А. Карякин, Заводская лаборатория, 20, 317, 1954; Информ. техн. листок ЛДНТП, № 17, 1956.
3. А. В. Карякин, Д. Н. Лазарев, Г. А. Барина, ДАН СССР, 106, 739, 1956.
4. М. А. Гладкова, Изв. мед. наук СССР, № 5, 47, 1958; Е. С. Лушников, М. А. Гладкова, Хирургия, № 1, 86, 1958.

ЛЮМИНОФОРЫ ДЛЯ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ЛАМП ВЫСОКОГО И НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

Ф. М. ПЕКЕРМАН

1. Люминофоры для люминесцентных ламп низкого давления с излучением в видимой области спектра

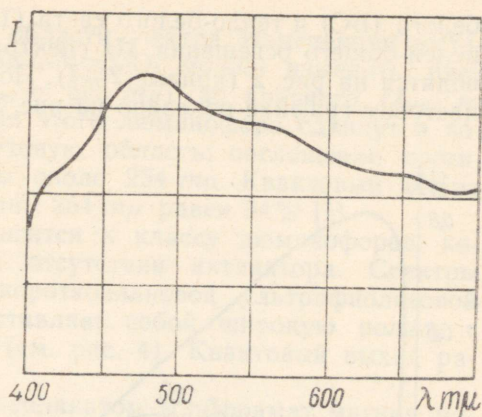
Преобразование энергии излучения ртутного разряда в излучение люминофоров было предложено С. И. Вавиловым в 20-х годах. Однако люминесцентные источники света с использованием такого преобразования были осуществлены только спустя 15 лет. Это объясняется, с одной стороны, необходимостью проведения исследований в области газового разряда и, с другой стороны, необходимостью разработки технологии изготовления люминофоров, пригодных для люминесцентных ламп. Ламповые люминофоры должны были обладать определенными свойствами. Например, для газоразрядных ламп низкого давления люминофоры должны были иметь поглощение в области 254 $m\mu$, обладать высоким квантовым выходом, обладать способностью к нанесению и быть стабильными при эксплуатации лампы.

Благодаря совершенствованию синтеза таких люминофоров и совершенствованию технологии газоразрядных источников современная люминесцентная лампа обладает чрезвычайно высокой светоотдачей и долговечностью. К ее недостаткам следует отнести некоторые трудности изготовления самой газоразрядной трубки и неудовлетворительное спектральное распределение излучения, связанное с недостаточным излучением в красной области спектра у ламповых люминофоров.

Возможность изменять спектральное распределение излучения, меняя люминофоры с различным цветом свечения или используя их смеси, является одним из преимуществ люминесцентных источников света. Основным требованием, предъявляемым при этом, является приближение к дневному свету, дающему правильную цветопередачу окружающих предметов. Кривая распределения энергии в спектре дневного света при безоблачном небе представлена на рис. 1.

Люминесцентная лампа, имитирующая дневной свет (цветовая температура 6000°K), обладает спектром излучения, пред-

Рис. 1. Кривая распределения энергии в спектре дневного света при безоблачном небе.



ставленным на рис. 2. (кривая 1). Кроме ламп дневного света, в настоящее время выпускаются люминесцентные лампы холодного белого света ($T_{цв} = 4800^{\circ}\text{K}$), белого света ($T_{цв} = 3500^{\circ}\text{K}$) и тепло-белого света ($T_{цв} = 2800^{\circ}\text{K}$). Из-за недостатка излучения в синей части спектра эти лампы не дают правильной цветопередачи, тем не менее цвет их свечения оказываются более приемлемым для человеческого глаза, чем цвет свечения лампы дневного света. В связи с этим лампы холодно-белого (ХБС),

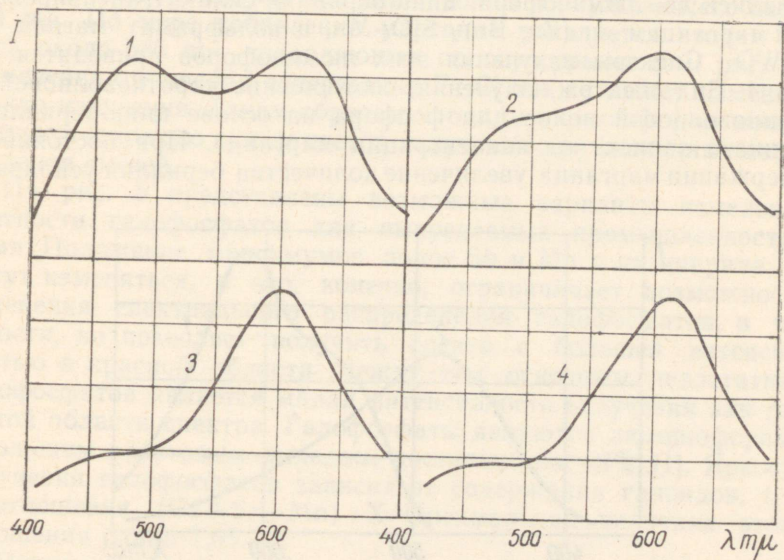


Рис. 2. Спектры излучения люминесцентных ламп:
1 — дневного света (ДС); 2 — холодно-белого света (ХБС); 3 — белого света (БС); 4 — тепло-белого света (ТБС).

белого (БС) и тепло-белого света (ТБС) чаще используются для целей общего освещения. Их спектральные характеристики приводятся на рис. 2 (кривые 2—4). Положение этих источников на цветовом графике показано на рис. 3.

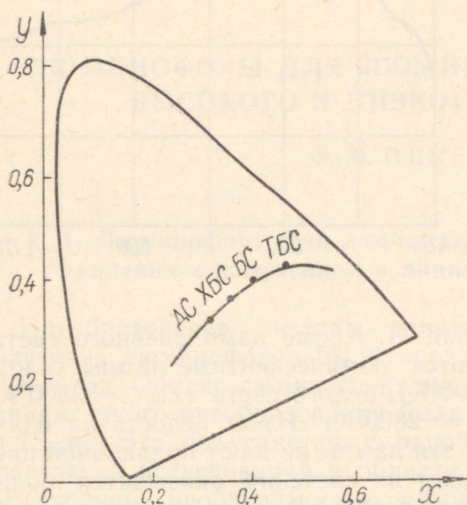


Рис. 3. Положение люминесцентных источников на цветовом графике.

До начала 50-х годов для люминесцентных ламп обычно применялись два люминофора: цинк-бериллий-силикат, активированный марганцем — $(\text{Zn}, \text{Be})_2 \text{SiO}_4\text{-Mn}$, и вольфрамат магния — MgWO_4 . Спектры излучения этих люминофоров приводятся на рис. 4. Вид спектра излучения, соотношение коротковолновой и длинноволновой полос для фосфора на основе цинк-бериллий-силиката зависят от концентрации марганца. При постоянном содержании марганца увеличение количества бериллия усиливает

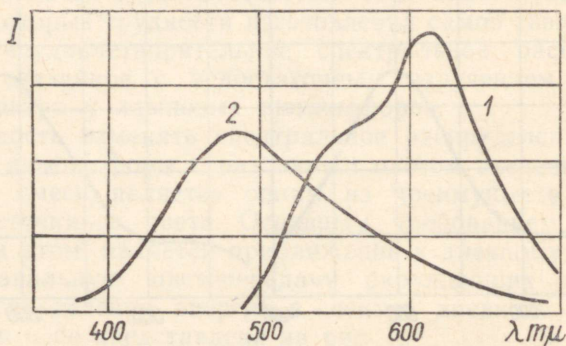


Рис. 4. Спектры излучения цинк-бериллий-силиката (кривая 1) и вольфрамата магния (кривая 2).

излучение в длинноволновой области спектра. Изменением состава в системе $\text{Zn}_2\text{SiO}_4\text{-Be}_2\text{SiO}_4\text{-Mn}_2\text{SiO}_4$ можно изменять цвет излучения от зеленого ($\lambda_{\text{макс}} = 523 \text{ м}\mu$) до красного ($\lambda_{\text{макс}} = 630 \text{ м}\mu$). Спектр поглощения этого люминофора сдвинут в коротковолновую ультрафиолетовую область; поглощение достигает максимальной величины около $254 \text{ м}\mu$. Квантовый выход при возбуждении длиной волны $254 \text{ м}\mu$ равен 94% [1].

Вольфрамат магния относится к классу люминофоров, которые люминесцируют при отсутствии активатора. Спектры поглощения его лежат в коротковолновой ультрафиолетовой области, а излучение представляет собой широкую полосу с максимумом около $480 \text{ м}\mu$ (см. рис. 4). Квантовый выход равен 80%.

В смеси с цинк-бериллий-силикатом вольфрамат магния может дать все варианты спектров излучения, необходимых для люминесцентных источников (см. рис. 3).

Дальнейшие попытки улучшить цветность люминесцентных ламп и их стабильность во времени привели к синтезу нового класса люминофоров на основе фосфатов элементов второй группы, впоследствии заменивших силикаты и вольфрамат в люминесцентных лампах. Наилучшими по спектральным и яркостным характеристикам являются люминофоры на основе галофосфата кальция $(3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2\text{CaX}_2$, где X — Cl и F), активированного сурьмой и марганцем [2].

При активации одной сурьмой галофосфат обладает излучением в области $480 \text{ м}\mu$ при длине волны возбуждающего света $254 \text{ м}\mu$. По мере добавления марганца появляется вторая полоса около $585 \text{ м}\mu$, подавляющая полосу сурьмы (см. рис. 5). Изменение отношения содержания F : Cl также может изменить спектр излучения. Таким образом, с одним люминофором можно получить широкую гамму цветов излучения для различных ламп, не делая смесей.

На рис. 5 представлены возможные варианты изменения цветности галофосфатов для выпускаемых промышленностью ламп. Положение максимумов полос Sb и Mn и их ширина не могут изменяться, и это, конечно, ограничивает возможности изменения спектрального распределения галофосфатов, в частности, не позволяет получить спектр с большей интенсивностью в красной области. Между тем основным недостатком галофосфатов является малая интенсивность излучения как раз в этой области спектра. Галофосфаты являются люминофорами с большим квантовым выходом, достигающим 82% [1]. Яркость излучения галофосфатов зависит от содержания галоидов, т. е. от отношения $(\text{Ca} + \text{Sr} + \text{Mn}) : \text{X}$. Оптимальная величина этого отношения равна 1,65.

Одним из ценных свойств галофосфатов, которое заставляет отдать им предпочтение по сравнению с силикатами, является их стабильность во времени. Подробное исследование пока-

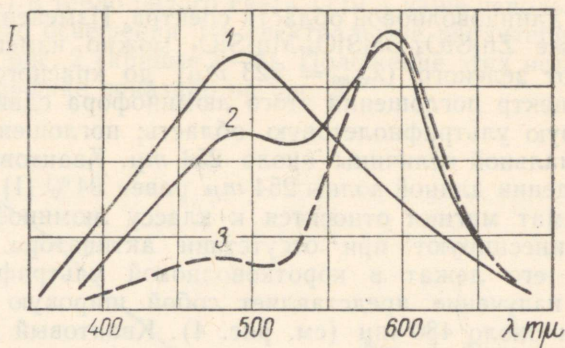


Рис. 5. Спектры излучения галофосфата, активированного сурьмой (кривая 1) и сурьмой и марганцем (кривые 2 и 3, различные концентрации марганца).

зало, что стабильность галофосфатов зависит от отношения основных окислов к кислотным и от температуры прокаливания [3]. При повышении этого отношения до 1,64 увеличивается яркость и стабильность.

Возможность замены смеси люминофоров одним люминофором, стабильность, дешевизна сырья — все это позволило широко использовать галофосфаты в качестве ламповых люминофоров. Однако лампы с галофосфатным покрытием оказались неудовлетворительными по цветности, поэтому дальнейшие усилия исследователей были направлены на разработку люминофоров, обладающих излучением, которое могло бы исправить цветность люминесцентных источников света.

Разработанный Фрелихом [4] люминофор $\text{CaSiO}_3\text{-Pb}$, Mn обладает спектром излучения, представленным на рис. 6. Этот

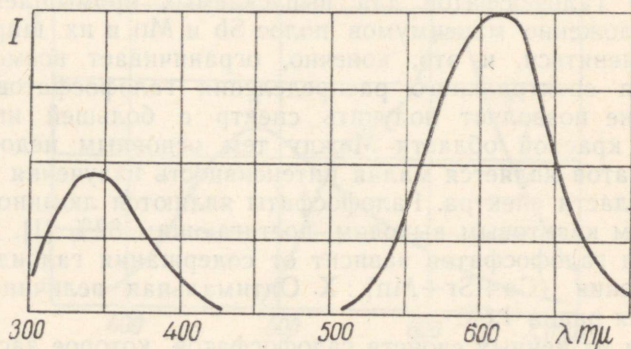


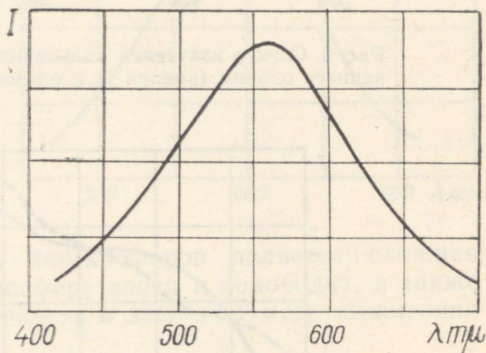
Рис. 6. Спектр излучения силиката кальция, активированного свинцом и марганцем.

люминофор так же, как и галофосфат, относится к типу сенсibilизированных люминофоров. Сенсibilизатором является свинец, который поглощенную им энергию в области $254\text{ м}\mu$ передает марганцу. Полоса излучения, обусловленная свинцом имеет максимум в ультрафиолетовой области ($\lambda_{\text{макс}} = 340\text{ м}\mu$), а полоса, обусловленная марганцем, расположена в оранжево-красной области спектра ($\lambda_{\text{макс}} = 610\text{ м}\mu$).

Для изготовления ламп, дающих правильную цветопередачу, к этому люминофору должен быть добавлен люминофор, излучающий в зеленой области спектра. Таковым может быть, например, силикат цинка, активированный марганцем, который, однако, не дает желательной стабильности.

Рэнби и Хендерсон [5] добавляли синтезированный ими фтор-силикат магния, активированный титаном или титаном и марганцем. Спектр излучения этого люминофора представлен на рис. 7. Лампы с этой комбинацией обладают высокой светоотдачей: 58 лм/вт для 40-ваттной лампы, и хорошей стабильностью.

Рис. 7. Спектр излучения фтор-силиката магния, активированного титаном.



Большой интерес представляет следующая группа люминофоров, синтезированных на основе фосфатов и смешанных фосфатов элементов второй группы, активированных оловом. Впервые смешанные ортофосфаты, активированные таллием, были синтезированы в СССР для люминесцентных ламп с излучением в ультрафиолетовой области спектра. При этом было замечено, что большой квантовый выход может быть получен только в том случае, если основание представляет собой смесь ортофосфатов различных металлов, например, стронция и кальция, или стронция и цинка и т. п.

Батлером [6] были синтезированы смешанные ортофосфаты кальция, стронция и бария, активированные оловом и марганцем, с излучением в видимой области спектра, причем в некоторых случаях с большой долей энергии в красной области спектра. Было установлено, что олово может излучать только в двухва-

лентном состоянии, поэтому прокалку люминофоров, необходимо проводить в атмосфере смеси азота и водорода (6,5—10%).

Наиболее пригодными для использования в люминесцентных лампах оказались кальций-стронций-фосфат, активированный оловом или оловом и марганцем (спектр излучения см. на рис. 8), и кальций-фосфат, активированный оловом или оловом и марганцем.

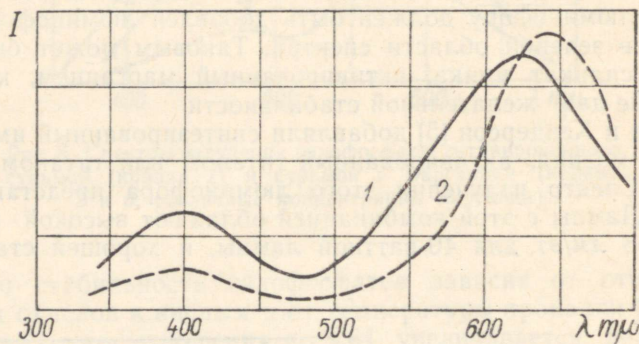


Рис. 8. Спектр излучения кальций-стронций-фосфата, активированного оловом (кривая 1) и оловом и марганцем (кривая 2).

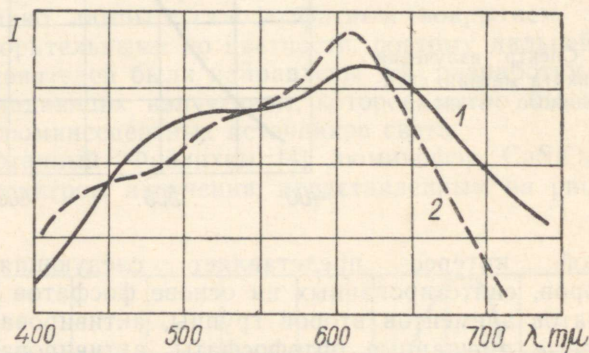


Рис. 9. Спектры излучения ламп с исправленной цветностью:

- 1 — основная компонента — $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2\text{-Sn}$;
- 2 — основная компонента — $\text{Ca Si O}_3\text{-Pb, Mn}$.

Батлером были созданы лампы с исправленной цветностью с люминесцирующим слоем из фосфата кальция, активированного оловом, силиката цинка и вольфрамата магния. Спектр излучения этой лампы приводится на рис. 9 (кривая 1). Для сопоставления на этом же рисунке приводится спектр излучения лампы, основной компонентой люминесцирующего слоя которой яв-

ляется $\text{CaSiO}_3\text{-Pb,Mn}$ (кривая 2). Как следует из рисунка, в 1-ом случае излучение в красной области спектра гораздо интенсивнее. Светоотдача таких ламп достигала 45 лм/вт через 100 часов для 40-ваттной лампы.

В последние годы была синтезирована целая серия люминофоров на основе смешанных ортофосфатов, активированных оловом [7].

Люминофоры с большим квантовым выходом при возбуждении $\lambda = 254 \text{ мк}$ были получены при частичном замещении стронция в $\text{Sr}_3(\text{PO}_4)_2\text{-Sn}$ алюминием, магнием, цинком и кадмием. Спектр излучения люминофора $\text{Sr}_3(\text{PO}_4)_2\text{-Sn}$ представлен на рис. 10. Интенсивность излучения этого люминофора в красной области спектра превышает не только излучение галофосфатов, но также и люминофора $\text{CaSiO}_3\text{-Pb,Mn}$.

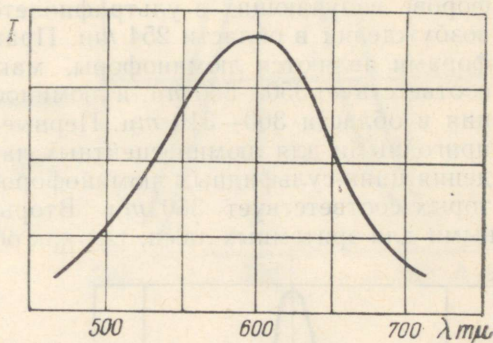


Рис. 10. Спектр излучения стронций-цинк-фосфата, активированного оловом.

Недостатком фосфатных люминофоров является сложная технология (прокалка в атмосфере азота и водорода), а также значительное снижение их яркости в лампе по мере выжигания биндера.

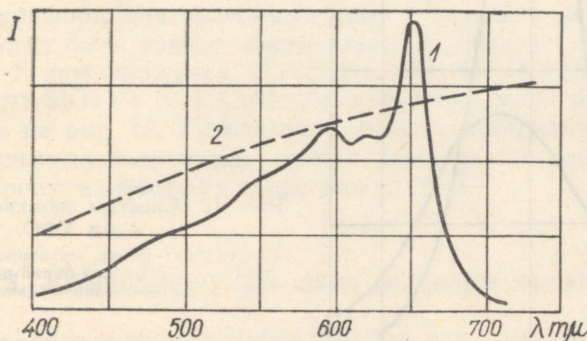


Рис. 11. 1 — Спектр излучения лампы Де-люкс белого света ($T_{\text{цв}} = 4200^\circ \text{K}$); 2 — распределение энергии в спектре излучения черного тела при $T_{\text{цв}} = 4200^\circ \text{K}$.

Возможность исправления цветности люминесцентных ламп была также показана в работе [8], где авторы добавили к галофосфату, кроме виллемита, арсенат магния (подробности о свойствах магний арсената см. дальше). Арсенат магния обладает большим квантовым выходом (85%) при возбуждении длиной волны 254 $m\mu$, спектр его излучения состоит из нескольких сравнительно узких полос, максимум основной полосы расположен около 630 $m\mu$. Спектр излучения разработанной в работе [8] лампы Де-люкс представлен на рис. 11.

2. Люминофоры для люминесцентных источников света с излучением в ультрафиолетовой области спектра

За последние годы появился ряд работ по синтезу люминофоров, излучающих в ультрафиолетовой области спектра при возбуждении в области 254 $m\mu$. Практически важными люминофорами являются люминофоры, максимум излучения которых соответствует 350—360 $m\mu$, и люминофоры с максимумом излучения в области 300—310 $m\mu$. Первые люминофоры оказываются пригодными для люминесцентных ламп, служащих для возбуждения цинк-сульфидных люминофоров, область возбуждения которых соответствует 360 $m\mu$. Вторые — оказываются пригодными для эритемных ламп, так как область эритемного действия

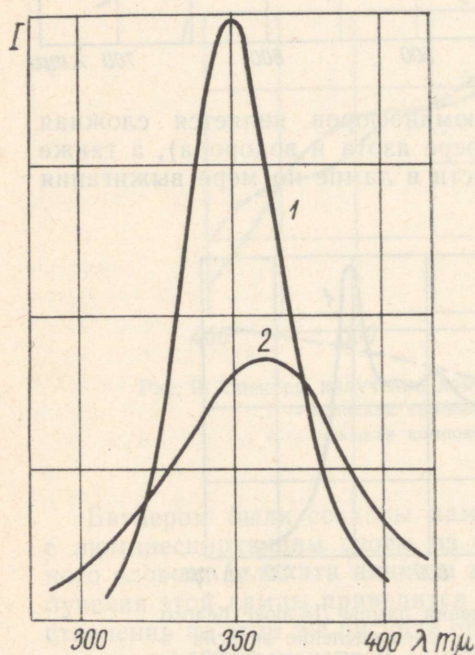


Рис. 12. Спектры люминофоров для ламп УФО:

1 — силикат бария, активированный свинцом; 2 — стронций-барий-цинк-силикат, активированный свинцом.

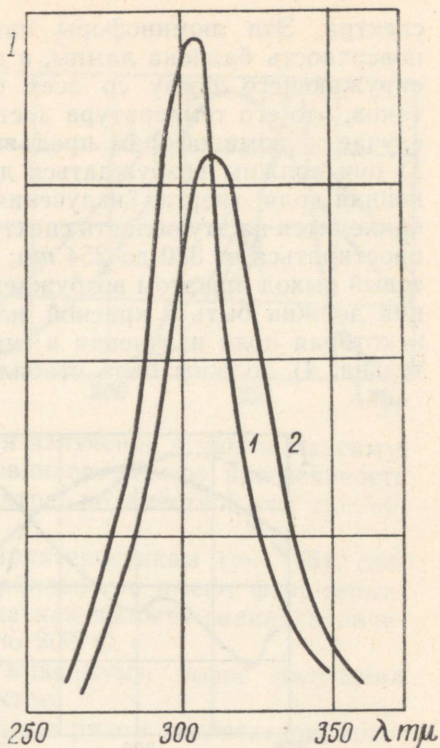


Рис. 13. Спектры излучения люминофоров для эритемных ламп:

1 — кальций-цинк-фосфат, активированный таллием; 2 — барий-магний-силикат, активированный свинцом.

соответствует 290—300 $m\mu$. Для ламп, излучающих в области 350—360 $m\mu$ наиболее пригодными оказались люминофору: $BaSiO_3-Pb$, $Sr_{0,6}, Ba_{1,4}, Zn_1Si_2O_7-Pb$ и $(Sr, Ca)_3(PO_4)_2-Tl$ [9]. Спектры излучения двух первых люминофоров показаны на рис. 12. Квантовый выход при возбуждении в области 254 $m\mu$ высок для них и достигает 80%.

Люминофору для эритемных ламп с большим квантовым выходом могут быть приготовлены также на основе фосфатов и силикатов. К ним относятся: $(Ca, Zn)_3(PO_4)_2-Tl$, $(Ca, Mg)_3(PO_4)_2-Tl$ и $(Ba, Mg)_3SiO_2-Pb$ [10]. Спектры излучения двух из них представлены на рис. 13. Изменение спектров (например, перемещение максимума излучения) может быть осуществлено изменением количества фосфата цинка или магния.

3. Люминофору для ламп высокого давления

Основное назначение люминофору для ламп высокого давления — исправление цветности, т. к. в излучении этих источников света наблюдается недостаток энергии в красной области

спектра. Эти люминофоры наносятся не непосредственно на поверхность баллона лампы, а на внутреннюю сторону колпака, окружающего лампу со всех сторон; диаметр этого колпака таков, что его температура достигает не более 300°C . В данном случае к люминофорам предъявляются следующие требования: 1) они должны возбуждаться длинноволновым светом, т. к. основная доля энергии излучения в лампах высокого давления приходится на эту область спектра; область возбуждения должна простирается от 380 до 254 $\text{м}\mu$; 2) должны иметь большой квантовый выход при этом возбуждении; 3) основная доля их излучения должна быть в красной или оранжевой области спектра, некоторая доля излучения в сине-голубой области также желательна; 4) должны быть стабильны при температуре 300°C .

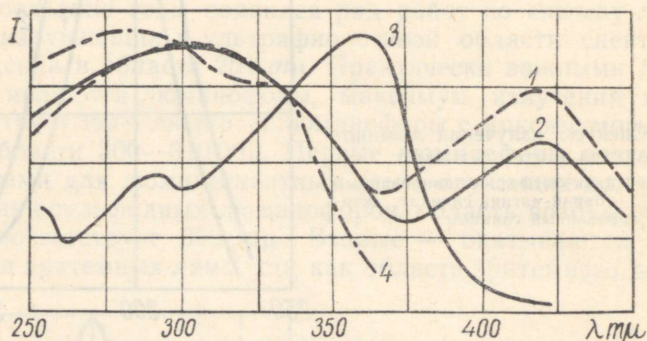


Рис. 14 Спектры возбуждения люминофоров для ламп высокого давления:

1 — фтор-германат магния; 2 — арсенат магния; 3 — барий-литий-силикат; 4 — стронций-цинк-фосфат.

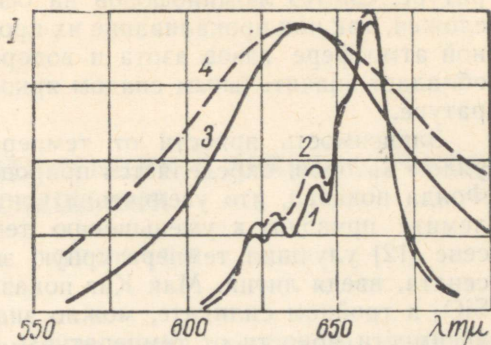
Люминофоры, более или менее отвечающие этим характеристикам, очень немногочисленны. К ним относятся магний-фтор-германат [11] и магний-арсенат [12], активированные марганцем, барий-стронций-литий-силикат, активированный церием и марганцем, и цинк-стронций-фосфат, активированный оловом [13]. Основные характеристики этих люминофоров показаны на рис. 14, 15, 16.

Как следует из спектров возбуждения (рис. 14), люминофоры магний-арсенат и фтор-германат хорошо возбуждаются длинноволновым и коротковолновым ультрафиолетовым светом, силикат хуже возбуждается в коротковолновой области, а область возбуждения стронций-цинк-фосфата сдвинута в коротковолновую область.

Спектры излучения магний-арсената и магний-фтор-германата состоят из нескольких полос с максимумами около 630 $\text{м}\mu$, 542 $\text{м}\mu$, 653 $\text{м}\mu$ и 660 $\text{м}\mu$ (рис. 15, кривые 1 и 2). Силикат и фос-

Рис. 15. Спектры излучения люминофоров для ламп высокого давления:

1 — арсенат магния; 2 — фтор-германат магния; 3 — барий-литий-силикат; 4 — стронций-цинк-фосфат.



фат обладают широкими полосами излучения с одним максимумом. Это, вообще говоря, обуславливает малую интенсивность излучения в красной области спектра, но вместе с тем способствует увеличению светоотдачи.

Переходя к температурным характеристикам (рис. 16), следует отметить, что наилучшую стабильность имеют фтор-германат и цинк-стронций-фосфат, тогда как яркость силиката начинает значительно падать уже около 200°C .

При повышении температуры максимумы полос излучения смещаются в желтую область спектра.

Описанные люминофоры обладают рядом недостатков, которые должны быть устранены при дальнейшем развитии синтеза люминофоров для ламп высокого давления. Так, люминофор на основе фтор-германата готовится из дефицитного сырья и поэтому не может быть использован в промышленности. Производство арсената магния токсично и, кроме того, этот люминофор

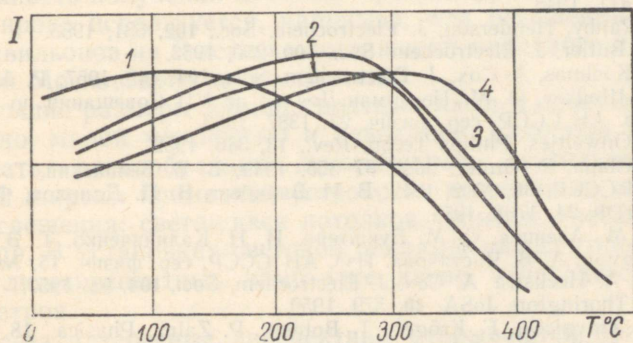


Рис. 16. Зависимость яркости от температуры для люминофоров, применяемых в лампах высокого давления:

1 — барий-стронций-литий-силикат, активированный церием и марганцем; 2 — арсенат магния, активированный марганцем; 3 — стронций-цинк-фосфат, активированный оловом; 4 — фтор-германат магния, активированный марганцем.

не обладает достаточной стабильностью при повышенной температуре. Синтез люминофоров на основе силикатов и фосфатов сложен, так как прокаливание их производится в восстановительной атмосфере газов азота и водорода. Силикат, кроме того, обладает значительным спадом яркости при повышенной температуре.

Зависимость яркости от температуры, как было показано рядом авторов, определяется природой основания и активатора. Фонда показал, что увеличение концентрации марганца в вилемите приводит к уменьшению температуры тушения. Класенс [12] улучшил температурную зависимость для магний-арсената, введя литий. Мак Киг показал, что изменяя количество SiO_2 в тройном силикате, можно значительно улучшить ход зависимости яркости от температуры.

Таким образом, дальнейшая задача, стоящая перед химиками, синтезирующими люминофоры для ламп высокого давления, заключается в синтезе люминофоров с повышенной долей излучения в красной области спектра и с хорошей стабильностью при изменении температуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Д. А. Шкловер, ЖТФ, **17**, 1239, 1941; Сборник рефератов научно-исследовательских работ по люминофорам, ГИПХ, 1957 г., стр. 30.
2. Британский патент 578192, 1942; Н. G. Jenkins, A. Mc Keag, P. Ranby, J. Electrochem. Soc., **96**, 1, 1949; А. А. Бундель, Б. И. Вайнберг, Т. Е. Добролюбская, В. В. Зелинский, Ф. М. Пекерман, Р. Г. Смирнова, А. К. Трофимов, С. П. Френкель, Изв. АН СССР, сер. физич., **15**, 815, 1951; M. Doherty, W. Harrison, Brit. J. of Appl. Phys., Suppl., № 4, 11, 1955.
3. Б. М. Гугель, М. М. Шапочкин, Материалы V Совещания по люминесценции, Тарту, 224, 1957 г.
4. H. Fröhlich, J. Electrochem. Soc. **93**, № 4, 1948; I. Merrill, J. Schulman, JOSA, **38**, 471, 1948.
5. P. Ranby, Henderson, J. Electrochem. Soc., **102**, 631, 1955.
6. K. Butler, J. Electrochem. Soc., **100**, 250, 1953.
7. H. Koelmas, A. Cox, J. Electrochem. Soc., **104**, 443, 1957; Р. А. Штрихман, Д. Н. Шойхет, Ф. М. Пекерман, Доклад на VII Совещании по люминесценции. Изв. АН СССР, сер. физич. **23**, 1387, 1959.
8. J. Onweltjes, Philips Techn. Rev., **13**, 346, 1952.
9. R. Clapp, R. Ginter, Jost, **37** 355, 1949; В. В. Зелинский, Т. В. Тимофеева, ДАН СССР, **66**, № 2, 1949; В. И. Вайнберг, В. П. Данилов, Ф. М. Пекерман, ЖЭТФ, **24**, 1708, 1954.
10. М. М. Алenceв, С. М. Букштейн, И. Н. Калининко, Т. В. Кузина, Ф. М. Пекерман, А. В. Чистякова, Изв. АН СССР, сер. физич. **15**, № 6, 1951; H. Klasens, A. Hockstra, A. Cox, J. Electrochem. Soc., **104**, 93, 1957.
11. L. Thorington, JoSA, **40**, 579, 1950.
12. M. Travnicsek, F. Kröger, T. Botden, P. Zalm, Physica, **18**, 33, 1952; H. Klasens, Philips Res. Rep., **9**, 377, 1954.
13. K. Butler, Ill. Eng., **51**, 613, 1956.

ПРИМЕНЕНИЕ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ В АРХИТЕКТУРНОМ ОСВЕЩЕНИИ

Н. В. ГОРБАЧЕВ

1. В контрольных цифрах развития народного хозяйства СССР на 1959—1965 годы, принятых XXI съездом КПСС, предусматриваются крупные капиталовложения на коммунальное строительство, строительство объектов культуры, просвещения и здравоохранения. Поэтому вопросы проектирования и оборудования общественных зданий современным, весьма экономичным люминесцентным освещением приобретают большое значение.

Архитектурное люминесцентное освещение в отличие, например, от промышленного должно не только удовлетворять всем требованиям действующих правил и норм, но быть также органически увязанным с архитектурой зданий, отвечать высоким художественно-эстетическим запросам.

Выпускаемые промышленностью миллионы люминесцентных ламп, в том числе мощные ртутные лампы с исправленной цветностью, позволяют значительно поднять освещенность как внутри зданий, так и на улицах городов. Производство ламп с различными спектрами излучения (типа ДС, БС, ТБС) обеспечивает возможность получения цветного архитектурного освещения, что уже широко используется, например, при освещении выставочных павильонов на Выставке достижений народного хозяйства и станций Московского метрополитена.

Большие размеры люминесцентных ламп в сочетании с относительно малой мощностью и невысокой яркостью позволяют создавать разнообразные декоративные светильники новых форм и широко применять устройства встроенного архитектурного освещения: светящихся потолков, панелей, световых карнизов и др. В установках световой рекламы наших городов общая длина люминесцентных ламп уже давно исчисляется сотнями километров.

Весьма интересные перспективы открываются при применении люминофоров в новейших источниках света — электролюминесцентных лампах и изделиях, которые позволят по-новому решать многие светотехнические и архитектурные задачи.

Наряду с использованием люминофоров в люминесцентных лампах, различные светящиеся материалы и краски могут с ус-

пехом применяться при проектировании установок архитектурного освещения и при выполнении декоративных элементов светового оформления интерьеров.

2. Для разработки проектов архитектурного освещения уникальных сооружений или типовых объектов массового строительства нами была предложена методика проектирования с помощью светящихся красок, позволяющая воспроизводить на эскизах объекты с реальным распределением яркостей [1]. Работая с обычными красками архитектор не может изобразить истинного распределения светотеней, так как градация яркостей на эскизе зависит от коэффициента отражения красок, который меняется в пределах от 0,80 для наиболее светлых тонов до 0,04 для черных. Таким образом, максимальное соотношение яркостей на эскизах составляет 20:1, тогда как в реальных условиях, как показывают измерения, это соотношение в десятки и сотни раз больше.

Преимущество эскизов, выполненных светящимися красками, заключается в том, что в зависимости от цвета краски и интенсивности ультрафиолетового облучения можно получить в светлых местах очень высокую яркость свечения (свыше 1000 нт) при практически нулевой яркости в темных участках эскиза. Увеличенная таким образом контрастность изображений, а также насыщенность светящихся красок создают особый эффект пластичности, хорошо передают фактуру материалов и игру света и теней.

Применение светящихся красок в проектных работах с успехом заменяет сложное и дорогостоящее моделирование осветительных устройств с помощью объемных макетов. Техника выполнения светящихся эскизов в настоящее время достаточно разработана и может быть рекомендована в проектных организациях и в архитектурных мастерских.

Для выполнения светящихся эскизов разработаны светящиеся водорастворимые краски, типа акварельных [2], которые в настоящее время выпускаются заводом «Красный художник» (Москва) в виде набора сухих красок 18 различных цветов. В отличие от люминофоров, выпускаемых в виде белых порошков, эти краски сохраняют свой цвет при обычном освещении таким же, как и при ультрафиолетовом облучении, вследствие чего посторонняя засветка, например, отраженным светом не изменяет их цвета и не снижает насыщенности.

При изготовлении светящейся акварели применяются люминофоры завода «Красный химик» (Ленинград) и их смеси с добавлением соответствующих пигментов. Следует отметить, что введение люминофоров в обычные акварельные краски или гуашь не может быть рекомендовано, так как многие пигменты этих красок глушат свечение люминофоров и краски перестают светиться. Для большей стойкости светящихся красок к ультрафиолетовому свету применяются преимущественно минеральные

пигменты [3]. В качестве связующего употребляется камедь, обладающая большой прозрачностью в ультрафиолетовой области спектра, хорошей растворимостью в воде и химической устойчивостью в смеси с люминофором и пигментом.

При облучении ртутно-кварцевой лампой типа ПРК-2 со светофильтром марки УФС-3 и при плотности облучения 80 мвт/см^2 яркость белых и светло-желтых красок составляет около 40 нт.

При работах с большими эскизами можно рекомендовать применение светящейся гуаши, техника рисования которой мало отличается от рисования обычной гуашью. Для получения большой яркости светящиеся краски наносятся более толстым слоем. При распылении светящихся красок с помощью аэрографа последний должен быть стеклянным или алюминиевым, так как в медном или латунном светящаяся краска теряет яркость.

При проектировании освещения городов можно рекомендовать выполнение профилей улиц с помощью светящейся туши, наносимой с помощью рейсфедера. Изменяя толщину светящейся линии можно создать эффект различной освещенности тех или иных участков улицы и наглядно продемонстрировать принятую систему освещения и осветительные устройства.

Следует отметить возможность получения эскизов и с помощью светящихся мелков, пастели и грифелей, производство которых осваивается на Московском заводе им. Сакко и Ванцетти.

В качестве подложки при рисовании светящимися красками может служить любая бумага или картон; при изображении интерьеров можно рекомендовать применение ватмана, а для ночных видов зданий и улиц города — черную бумагу. Для ускорения работы светящиеся краски можно наносить на фотоувеличения.

Для предохранения от механических повреждений и загрязнений, а также для повышения стойкости к атмосферным влияниям светящиеся эскизы целесообразно покрывать защитным слоем. Хорошим лаком для этих целей является частично полимеризованный мономер, наносимый кистью или аэрографом. Получаемая при этом защитная пленка хорошо пропускает ультрафиолетовый свет и достаточно прочна. Защищенные таким образом светящиеся эскизы сохраняются десятки лет без существенных изменений яркости и цвета красок.

3. В качестве источников ультрафиолетового света могут быть применены ртутно-кварцевые лампы типа ПРК и СВД различных мощностей, а также люминесцентные лампы типа УФО [4]. Наиболее пригодными являются ртутно-кварцевые лампы типа ПРК-2, выпускаемые Московским электроламповым заводом. Эти лампы потребляют мощность 375 вт и включаются последовательно с дросселем в сеть напряжения 220 в. В качестве «черного» фильтра применяется стекло марки УФС-3 толщиной 3—4 мм, размером $150 \times 150 \text{ мм}$.

Для ламп ПРК-2 во Всесоюзном научно-исследовательском светотехническом институте (ВНИСИ) были разработаны и выпущены приборы типа ПУФ-2 с цилиндрическим стеклом марки УФС-3. В настоящее время эти приборы усовершенствованы, снабжены параболическими рефлекторами из полированного алюминия и плоскими светофильтрами, что повысило интенсивность ультрафиолетового излучения в аксиальном направлении в 4,5 раза.

Очень удобными в работе показали себя предложенные нами для работы со светящимися красками люминесцентные лампы типа УФО мощностью 15 *вт* с люминофором марки Л-33 [5.] Как показала многолетняя эксплуатация в производственных условиях, эти лампы могут во многих случаях с успехом заменить ртутно-кварцевые лампы.

Сравнение ламп ПРК, СВД, УФО, как источников ультрафиолетового излучения для работ со светящимися красками, показало, что лампы УФО обладают значительно меньшим удельным расходом энергии на единицу ультрафиолетового излучения.

В таблице 1 приведены результаты измерения удельного расхода энергии на единицу плотности ультрафиолетового облучения для ламп типа ПРК, СВД, УФО, произведенных с помощью отградуированной пластинки из светящейся пластмассы с цинк-сульфидным кристаллофосфором. Из таблицы видно, что удельный расход люминесцентных ламп УФО-15 почти в 4 раза ниже, чем у ртутно-кварцевых ламп высокого давления.

Для люминесцентных ламп УФО-15 ВНИСИ разработал и выпустил несколько серий настольных трехламповых светильников типа ПУФ-5. Улучшая оптику этих приборов, применяя вместо диффузного отражателя параболический отражатель из полированного алюминия, а также создавая форсированный режим для горения ламп, изменяя электрическую схему питания ламп и увеличивая силу тока почти в 2 раза, интенсивность ультрафиолетового света в приборах последнего выпуска была повышена в 2,15 раза. Продолжительность горения ламп УФО-15 при этом уменьшается с 2000 до 500 часов.

Для облучения ультрафиолетовым светом эскизов больших размеров применяются светильники с лампами ПРК-7 мощностью 1000 *вт* с осветительные устройства с люминесцентными лампами типа УФО-40 мощностью 40 *вт*.

Следует отметить, что широко распространенные за рубежом [6] ртутные лампы высокого давления мощностью 80 *вт* и 125 *вт*, выпускаемые в колбах из черного стекла, нашей промышленностью в настоящее время, к сожалению, не изготавливаются.

4. При выполнении проектов с помощью светящихся эскизов иногда бывают необходимы изменения яркости отдельных участков изображения. Поскольку при этом обычно не требуется высокая точность, можно рекомендовать проводить измерения с помощью светящихся шкал относительных яркостей и обычного

Характеристика источников ультрафиолетового света при измерении
облученности на расстоянии 1 метра

Тип лампы	Напряжение сети (в)	Мощность лампы (вт)	Ультрафиол. облучение ($\mu\text{вт/см}^2$)	Удельный расход энергии (вт/ $\mu\text{вт/см}^2$)
ПРК-7	220	1000	375	2,7
ПРК-2	220	375	120	3,1
ПРК-4	127	220	62	3,5
СВД-120А	127	120	30	4,0
УФО-15	127	15	19	0,8

селенового люксметра. Люксметром определяется интенсивность ультрафиолетового облучения в «черных» люксах или микроваттах на кв. см, а предварительно отградуированная цветная свечящаяся шкала позволяет легко измерять величины яркостей в нитах в различных местах эскиза.

В практике работы хорошо зарекомендовали себя портативные свечящиеся шкалы ВНИСИ, выполненные на оргстекле длиной 150 мм и шириной 35 мм, технология изготовления и световые характеристики которых были своевременно описаны [3].

При разработке методологии проектирования с помощью свечящихся красок была проведена экспериментальная проверка возможности и точности воспроизведения на свечящихся эскизах яркостей, имеющих место в интерьерах. С этой целью был выполнен эскиз платформенного зала Бауманской станции Московского метрополитена, в котором предварительно с достаточной точностью было измерено существующее распределение яркостей. Светящийся эскиз рисовался и просматривался при облучении лампой ПРК-2 (в черной колбе), расположенной от плоскости эскиза на расстоянии 32 см.

Проведенные контрольные измерения яркости отдельных участков эскиза с помощью универсального мигающего фотометра показали, что существенных расхождений с реальным распределением яркостей не было, и диапазон яркости на эскизе составлял от 1 до 200 нт, в то время как в действительности были измерены яркости в пределах от 2 до 190 нт. Интересно отметить, что на эскизе этого помещения, выполненном обычными акварельными красками, коэффициенты отражения красок находились в пределах от 0,12 до 0,68. В то время как распределение яркости потолка в реальных условиях и на свечящемся эскизе определялось отношением $V_{\text{макс}} / V_{\text{мин}} = 8,5$, на акварельном эскизе оно было равно 1,8.

При интенсивном облучении свечящихся эскизов можно с точностью воспроизводить яркость люминесцентных ламп, светильников с рассеивающими стеклами и фактуру отделочных



Рис. 1. Светящийся эскиз к проекту освещения фасадов здания гостиницы «Украина».

материалов при различных способах освещения, блики на шелке, глазурованных плитках, полированном мраморе и т. д.

Многолетний опыт систематического применения светящихся красок при проектировании освещения фасадов высотных зданий в Москве и в Варшаве, освещения города Сталинграда, Дворца Советов СССР, Куйбышевского гидроузла и других

объектов, а также различных архитектурно-декоративных и иллюминационных устройств в Москве в праздничные дни, полностью подтвердил их значительные преимущества.

На эскизе интерьера музея, оборудованного светящимся потолком, для получения необходимого диапазона яркостей (3,6 — 146 нт) потребовалось облучение двумя лампами ПРК-2, установленными от эскиза на расстоянии 40 см. Однако просмотр этого эскиза при облучении ультрафиолетовым светом меньшей интенсивности показал, что вследствие влияния окружающего темного фона на адаптацию для суждения о художественной ценности принятого светового решения нет необходимости в точном воспроизведении рассчитанных значений яркостей.

Сравнительная оценка различных вариантов освещения, изображаемых на светящихся эскизах, может быть произведена бинокулярным поляризационным измерителем видимости системы Дашкевича, с помощью которого легко определяется степень видимости основных элементов архитектуры здания.

5. С помощью люминесцирующих материалов и красок могут быть с успехом выполнены отдельные декоративные элементы светового оформления интерьера. К этим материалам, в первую очередь, относятся светящиеся пластмассы, эмали, ткани, стекло и новые флуоресцирующие декоративные краски.

Светящаяся пластмасса, выпускаемая заводом «Карболит» на основе применения оргстекла и люминофора ФКП-ОЗК (ВТУ МХП 1194—50), обладает яркостью, равной 80% яркости люминофора, и длительным послесвечением. В зависимости от марки примененного люминофора светящаяся пластмасса может быть получена и других цветов. Пластмасса легко поддается механической обработке и обычно выпускается заводом в виде плоских листов размером до 250×250 мм. В последние годы во ВНИСИ разработана люминесцентная силикатная эмаль для керамики и для стальных поверхностей с длительным послесвечением [7]. Эта эмаль представляет собой силикатное стекло с введенным в него мелкодисперсным люминофором ФКП-ОЗК. По разработанной ВНИСИ рецептуре и технологии были проведены опытные варки силикатной люминесцирующей эмали для нанесения на керамику и на грунтованную сталь. В результате сравнительных испытаний светящейся эмали и пластмасс завода «Карболит» была выявлена более высокая стойкость эмали к атмосферным влияниям. В закрытых помещениях светящиеся эмали и пластмассы имеют примерно одинаковую яркость свечения и длительность послесвечения.

Исследование люминесценции различных стекол показало, что для практического применения различных в декоративном оформлении помещений могут быть рекомендованы только урановые желтые стекла марки ЖС, яркость свечения которых соответствующей обработкой может быть доведена до 40% яркости люминофора ФКП-ОЗ.

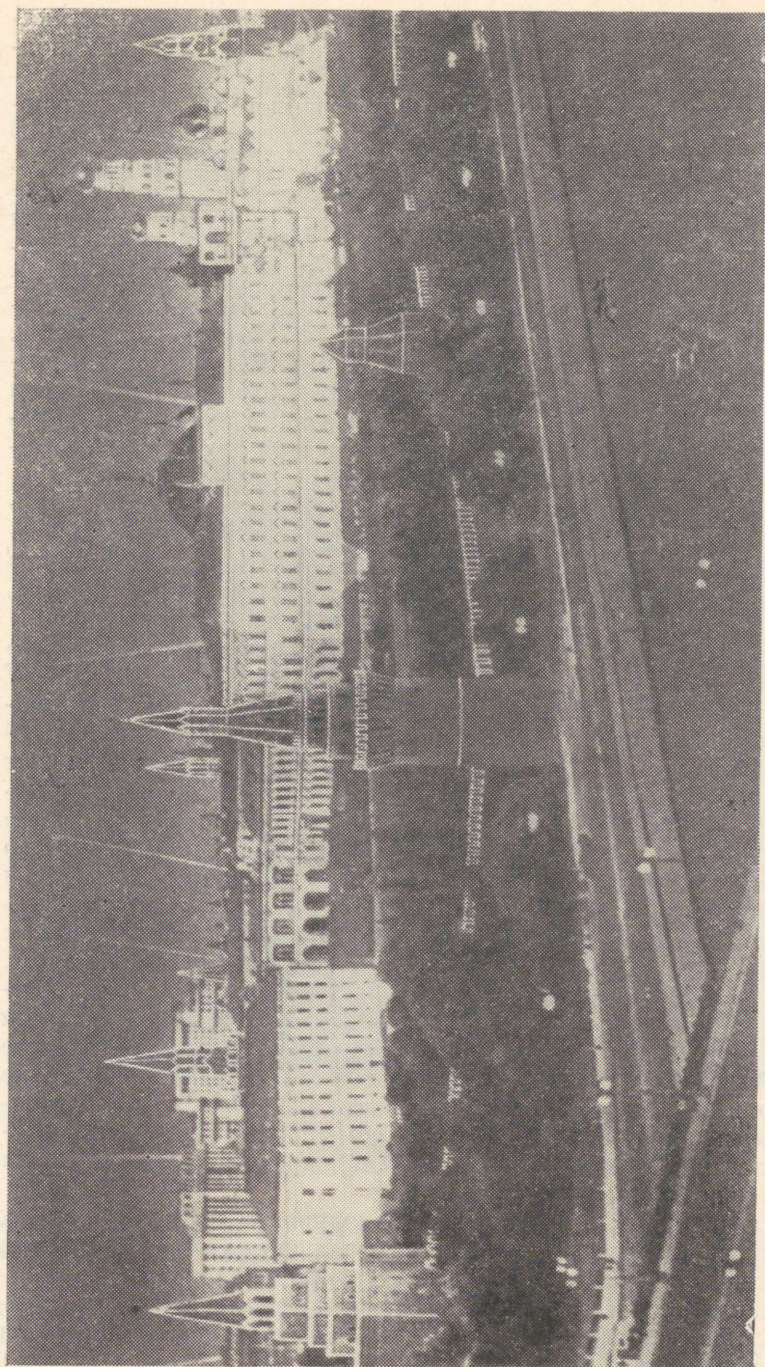


Рис. 2. Свечащийся эскиз декоративно-иллюминационного освещения Московского Кремля в праздничные дни.

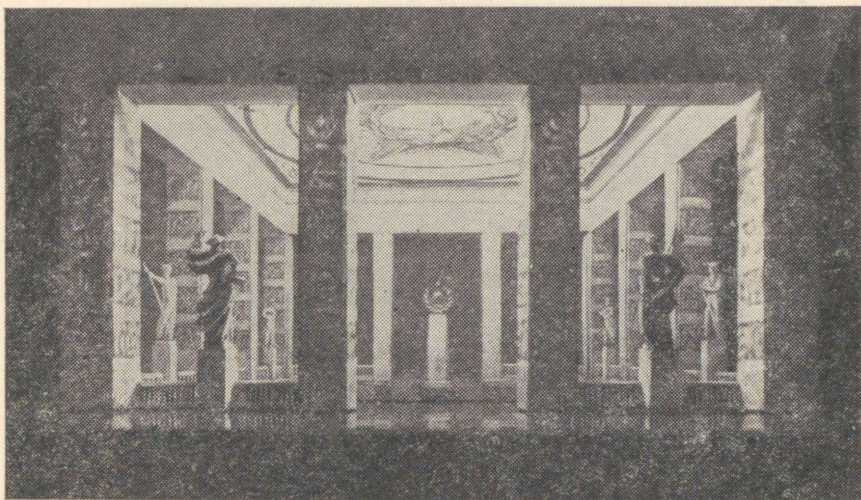


Рис. 3. Светящийся эскиз к проекту архитектурного освещения интерьера зала со светящимся потолком.

В числе отделочных люминесцирующих материалов большим разнообразием отличаются светящиеся ткани. Путем окрашивания органическими люминесцирующими красителями и разрисовкой светящимися красками были получены весьма интересные декоративные ткани и ковры, удачно использованные в архитектурном оформлении помещений.

При раскраске стен и потолка могут быть применены светящиеся масляно-лаковые краски, разработанные во ВНИСИ.

Очень эффективным декоративным материалом являются светящиеся присыпки, изготавливаемые из шелковой или шерстяной материи, окрашенные с помощью адсорбционных органических светящихся пигментов и красок. При нанесении этих присыпок в сухом виде на липкую поверхность создается впечатление рельефных светящихся вышивок и аппликаций.

6. Успешная разработка различных светящихся материалов и красок, а также источников ультрафиолетового излучения обеспечили выполнение образцов новых типов люминесцентных декоративных светильников и устройств архитектурного освещения. Были разработаны образцы двух декоративных светильников: 1) подвесного типа с применением светосоставов, обладающих длительным послесвечением, и 2) настенного двухлампового светильника с применением флуоресцирующих красок. Эти светильники могут служить в качестве элементов светового оформления интерьеров в общественных зданиях, театрах, домах культуры, ресторанах, а также в быту.

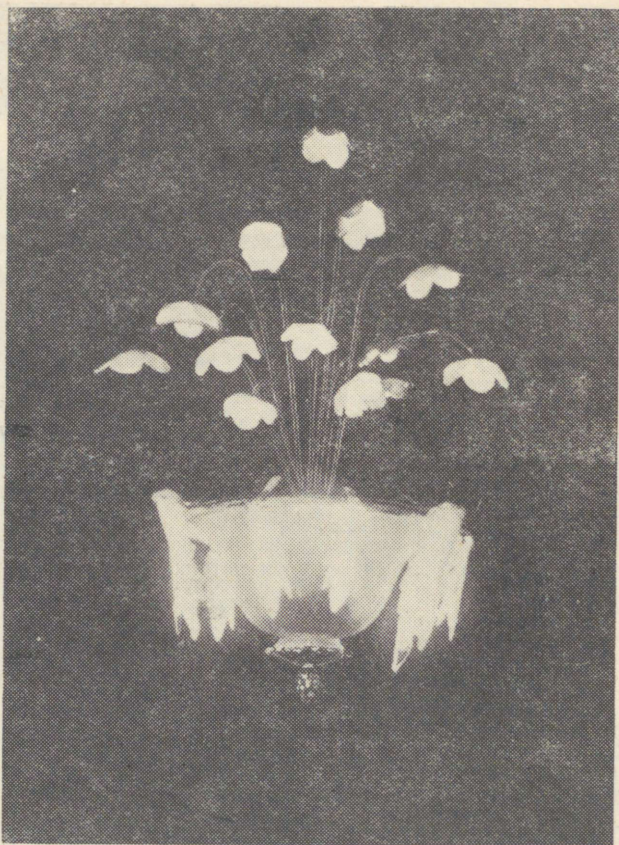


Рис. 4. Подвесной декоративный люминесцентный светильник типа ДПС ВНИСИ с лампой СВД-120А.

Подвесной декоративный светильник типа ДПС представляет собой чашу с цветами (см. рис. 4). Чаша выполнена из матированного стекла, заканчивающегося снизу металлической розеткой. Из чаши поднимаются декоративные светящиеся цветы. Светильник подвешивается к потолку с помощью потолочной розетки.

Внутри чаши в качестве источника ультрафиолетового света установлена ртутная лампа СВД-120А. Дроссель лампы помещается отдельно от светильника. Ртутная лампа закрыта со всех сторон черным увиолевым стеклом марки УФС-3.

Светящиеся цветы состоят из стеблей, выполненных из стеклянных трубок диаметром 4 мм, заполненных внутри люминофором марки ФКП-ОЗК. Стебелек заканчивается пятилепестковым

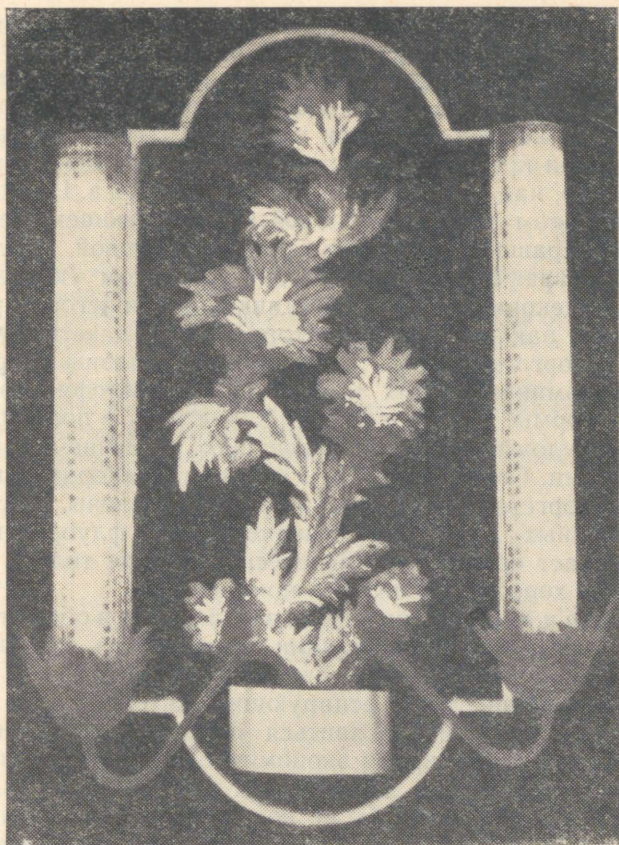


Рис. 5. Настенный декоративный люминесцентный светильник типа ДНС-30 ВНИСИ с двумя лампами УФО-15.

цветком, выполненным так же, как и листья, из прессованного оргстекла, покрытого с внутренней стороны люминофором ФКП-ОЗК. Светильник при включенной лампе обладает яркостью, достаточной для хорошего видения в освещенном помещении. В темноте после выключения лампы он продолжает светиться в течение нескольких часов, являясь хорошим ориентиром-ночник. На этом принципе возможно изготовление ряда декоративных светильников для различных общественных и бытовых помещений.

Настенный светильник (ДНС-30), окрашенный флуоресцирующими красками ВНИСИ и облучаемый ультрафиолетовым светом с помощью двух люминесцентных ламп, выполнен на сюжет народной сказки в виде декоративного «Аленького цветочка»,

в стиле Вятских кустарных художественных изделий (рис. 5). Светильник состоит из рельефного светящегося цветка, двух кронштейнов с цилиндрической арматурой, содержащей люминесцентные лампы типа УФО-15 и цилиндрические светофильтры марки УФС-3. Цветок выполнен из папье-маше и окрашен флуоресцирующими красками по белому грунту. Окраска закреплена лаком ВМК-5, нанесенным с помощью аэрографа. Цветок укреплен на фанерном щитке толщиной 6 мм, имеющем рельефную фактуру и окрашенном несветящейся коричневой краской при помощи аэрографа. На щитке под орнаментом укреплены два стартера, задекорированные пластинкой светящегося оргстекла. Кронштейны заканчиваются декоративными светящимися чашечками из оргстекла, внутри которых укреплены патроны для установки люминесцентных ламп и черного светофильтра цилиндрической формы. Лампа и фильтр заключены в полуцилиндр из оргстекла, художественно оформленного тиснением и светящимися красками. Сверху цилиндры прикрыты декоративными колпачками из оргстекла, внутри которых укреплены патроны для люминесцентных ламп. Применение ярких флуоресцирующих красок придает светильнику интересный вид не только в затемненных, но и хорошо освещенных помещениях.

Установка и опробование этих светильников в общественных и бытовых помещениях подтвердили возможность получения новых интересных декоративных световых эффектов.

При применении люминесцирующих материалов в архитектуре интерьера они могут явиться основным источником эффективного и в то же время экономичного архитектурного освещения [8]. В помещении лаборатории площадью 30 кв. м потолок, стены, пол и мебель были покрыты художественной росписью с помощью различных люминофоров и флуоресцирующих красителей, создавших сказочное убранство комнаты дворцового типа. Ультрафиолетовое облучение производилось двумя подвешенными к потолку ртутно-кварцевым лампами ПРК-2 в черных стеклах и одной лампой ПРК-4, установленной в камине для подсветки материалов, имитирующих горящие угли. Эти лампы обеспечили достаточно высокую яркость свечения светосоставов, достигающую в отдельных случаях до 15 нт, и горизонтальную освещенность в центре комнаты на высоте 1 м, равную 5 лк.

Выполненная установка производила большое впечатление и по оценке посетителей убедительно показала возможность и техническую целесообразность использования люминесцирующих материалов для получения новых, совершенно необычных световых и цветовых декоративных эффектов.

Организация промышленного производства светящихся красок и материалов, а также ртутных ламп в черных колбах, позволит еще шире применять люминесценцию в архитектурном проектировании и освещении.

В заключение считаю необходимым отметить большую работу т. т. М. И. Агранян и П. С. Евдокишкина по разработке светящихся красок, по выполнению светящихся эскизов и изготовлению светильников, проведенную в лаборатории архитектурного освещения ВНИСИ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. В. Горбачев, Сборник Всесоюзной научно-технической сессии по светотехнике, Госэнергоиздат, 1948.
 2. М. И. Агранян, Н. В. Горбачев, Авт. свид. № 76789 от 30/VII—1949.
 3. Н. В. Горбачев, Изв. АН СССР, сер. физич., 13, № 2, 1949.
 4. Н. В. Горбачев, Изв. АН СССР, сер. физич., 15, № 5, 1951.
 5. Н. В. Горбачев, Изв. АН СССР, сер. физич., 21, № 4, 1957.
 6. M. Dérivé, Les applications pratiques de la luminescence, Paris, 1955.
 7. В. И. Долгополов, Отчет ВНИСИ № 490, 1958.
 8. З. М. Горев, Сборник Всесоюзной научно-технической сессии по светотехнике, Госэнергоиздат, 1948.
-

СВЕТАЯЩИЕСЯ КРАСКИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ТЕАТРАХ И КИНОСТУДИЯХ

М. И. АГРАНЯН

Светящиеся краски, обладая бóльшим диапазоном яркостей и цветностей, чем обычные краски, значительно расширяют изобразительные средства художника-декоратора. Трудно учесть все многообразие возможностей использования светящихся красок на театральных сценах и при киносъемках, тем не менее можно указать на основные наиболее характерные случаи их применения.

Чаще всего ими пользуются для повышения яркостного контраста, для достижения художественных эффектов, основанных на применении насыщенных чистых цветов и для обогащения фантастических сказочных образов.

Большие возможности открываются перед театральными художниками при использовании светящихся красок для оформления «трансформирующихся» декораций. С их помощью легко осуществить быструю полную или частичную перемену декорации. Световое решение декорации, выполненной светящимися красками, дает реальное представление о распределении света и уровней освещенности.

В киностудиях при комбинированных съемках отдельных рисованных кадров и целых мультипликационных фильмов применение светящихся красок имеет также большое значение.

Художник, применяя обычные краски, не может передать в декорации бóльшие контрасты, чем позволяет коэффициент отражения красок. Поэтому до последнего времени получение многих световых эффектов зависело исключительно от искусства кинооператора и осуществлялось при съемке в две экспозиции с применением специальных кашет. Большая затрата времени на изготовление сложных кашет удорожала производство кинофильмов, а полученные механическим путем эффекты часто не удовлетворяли по своим художественным качествам.

С применением светящихся красок процесс производства многих световых эффектов значительно упрощается и, что особенно важно, наряду с повышенной яркостью изображения обеспечивается получение на киноплёнке чистых насыщенных цветов.

Нашей промышленностью выпускаются в продажу два типа светящихся составов, которые могут применяться для приготовления светящихся красок. Это цинк-сульфидные и кадмий-сульфидные люминофоры и органические светящиеся составы — люмогены. Люмогены выпускаются промышленностью трех марок: люмоген светло-желтый, люмоген водно-голубой и люмоген оранжево-красный. Люмогены обладают тонкой структурой и вполне пригодны для приготовления красок. Однако для декоративных целей нами использовался только люмоген желтый, так как высокая стоимость люмогенов двух других марок ограничивает области их применения.

Сульфидные люминофоры выпускаются заводом «Красный химик» в виде порошков, которые при белом свете выглядят белыми, а при возбуждении ультрафиолетовым светом каждый из них светится характерным для него цветом. Максимальная чистота и насыщенность цвета свечения этих люминофоров наблюдается только при облучении их ультрафиолетовым светом без белой подсветки. Белый свет отражается от них, как от любой белой поверхности, и, примешиваясь к цвету свечения, разбеливает его.

Люминофоры некоторых марок обладают остаточным свечением, т. е. после облучения каким-либо источником света (лампами накаливания, люминесцентными лампами, ультрафиолетовыми источниками) или дневным светом продолжают светиться в темноте еще некоторое время с различной длительностью послесвечения.

Работая в течение ряда лет в лаборатории архитектурного освещения Всесоюзного научно-исследовательского светотехнического института над вопросами техники применения светящихся красок в архитектурном проектировании, мы исследовали большое количество приведенных в литературе рецептов светящихся красок. Оказалось, что почти все они основаны на применении люминофоров совместно со связующими, не выдерживающими длительного хранения, что вынуждает приготавливать краску непосредственно перед работой. Работа с люминофорами в порошкообразном виде создает большие неудобства. Приготовленные, но не использованные краски, быстро портятся, что ведет к большим потерям дорогостоящих люминофоров. Применение многих связующих, основанных на мономерях и ароматических углеводородах, вредит здоровью так же, как люминофоры, распыленные в воздухе во время работы. Многие связующие быстро сгущаются и тянутся во время работы или требуют подогрева, что вынуждает художников работать в непривычной и неудобной технике письма. В литературе встречаются также рекомендации смешивать люминофоры с обычными готовыми красками. Однако часто даже самые прочные краски в смеси с неудачными компонентами могут быстро разрушать друг друга в результате взаимодействия их составных элементов. Это ведет к потемне-

нию слоя и к исчезновению свечения. Вредное взаимодействие обычно усиливается при облучении ультрафиолетовым светом.

Поскольку светящиеся составы подчинены закону аддитивности, результат смешения светящихся красок получается несколько иным, чем результат смешения обычных красок. Поэтому художникам, привыкшим пользоваться смешением красок (а не цветов), не всегда удастся путем смешения светящихся красок получить необходимые оттенки.

На пятом Совещании по люминесценции было обращено внимание на отсутствие «белил» в палитре светящихся красок, в связи с этим предлагалось осуществить промышленный выпуск белых люминофоров. Однако белые светящиеся краски можно легко получить путем смешения люминофоров различного цвета. При проведении работ в студии Союзмультфильм по применению светящихся красок в мультипликационной съемке нами было изготовлено 13 белых красок различных оттенков, в том числе с цветом излучения, соответствующим источникам света Е, С и Б с цветовой температурой, равной 5000°K , 6500°K и 4800°K .

На основании проведенных исследований представлялось интересным разработать технологию изготовления различных типов светящихся красок, готовых к употреблению, которые могут выпускаться промышленностью и сохраняться в готовом виде долгое время. Применяемые в изобразительном искусстве различные краски в зависимости от связующего — эмульсии, масла или смолы, соответственно называются темпера, масло, акварель и т. п. При разработке рецептур светящихся красок нами были применены те же термины, хотя техника работы с ними имеет свои специфические особенности. Чтобы сохранить насыщенность светящихся красок при использовании их в смешанном свете (ультрафиолетовый свет с белой подсветкой), в состав красок вводились несветящиеся пигменты. Разные пигменты имеют неодинаковый коэффициент поглощения ультрафиолетового света. Введение в светящиеся краски даже прозрачных наполнителей, как показывают опыты, ведет к значительной потере их яркости. Из двух образцов светящихся красок, выполненных нами при исследовании влияния наполнителей на свойства красок, один был приготовлен из чистого цинк-сульфидного люминофора, а другой — из смеси того же люминофора с кварцевым порошком в соотношении 1:1. Обе краски были нанесены на рисовальную бумагу с таким расчетом, чтобы одно и то же количество люминофора приходилось на одну и ту же площадь бумаги. Опыт показал, что введение в состав краски кварцевого порошка снижает яркость свечения этой краски на 17%.

При введении в светящуюся краску несветящегося пигмента цветовой тон ее излучения соответственно изменяется. Из одного и того же люминофора можно получить краски различных оттенков: например, из люминофора ФК-102 при добавлении к

нему различных пигментов того же цвета был получен набор оранжевых светящихся красок.

Как показали опыты, проведенные Н. С. Ивановой, аналогичные изменения насыщенности и цвета излучения путем добавления пигментов можно получить и для ламповых люминофоров. Это дает возможность изготавливать цветные люминесцентные лампы с различными оттенками свечения. Для примера на рис. 1 и 2 приведены спектры излучения некоторых чистых люминофоров (без пигмента) и люминофоров, к которым добавлены те или другие пигменты.

При составлении светящихся красок необходимо учесть возможное взаимодействие веществ, входящих в люминофор и не светящийся пигмент. Некоторые пигменты темнеют в присутствии сернистых соединений, которые входят в состав люминофора, а люминофор, в свою очередь, может терять способность светиться, если добавляемый пигмент содержит примесь железа.

Выбор связующего также требует большой осторожности. Связующие светящихся красок по сравнению со связующими обычных красок должны удовлетворять дополнительным требованиям: а) они должны обладать максимальной прозрачностью для длинноволновых ультрафиолетовых лучей (в области 365 $m\mu$) и, по возможности, поглощать более коротковолновые лучи, вызывающие потемнение краски; б) не должны иметь в своем составе свободной кислоты, которая ведет к быстрому разложению люминофоров; в) величина pH не должна быть ниже 7, чтобы краска была достаточно устойчивой.

Введение диспергаторов и суспензирующих веществ улучшает качество красок, приготовленных из цинк-сульфидных и кадмий-сульфидных люминофоров. Они способствуют равномерному распределению люминофора в связующем веществе.

Как известно, цинк-сульфидные и кадмий-сульфидные люминофоры в присутствии влаги при облучении ультрафиолетовым светом быстро темнеют. Этот процесс можно значительно ослабить введением в состав краски ингибиторов.

С учетом вышесказанного нами были разработаны рецептуры, по которым были изготовлены светящиеся акварель, гуашь, темпера, масло, пастель, мультипликационные краски, органические пигменты, присыпки и другие краски специального назначения. Некоторые из них демонстрировались на Всесоюзной промышленной выставке 1957—1958 гг.

Из разработанных нами светящихся красок светоакварель пользуется наибольшей популярностью. Она внедрена в производство и выпускается с 1950 г. Светоакварель выпускается аналогично обычной акварели в коробках, содержащих 18 сухих красок различного цвета. Техника работы со светящейся акварелью несколько отличается от техники работы с обычной акварелью. Обычная акварель готовится из очень тонко растертых пигментов, позволяющих получить почти прозрачные

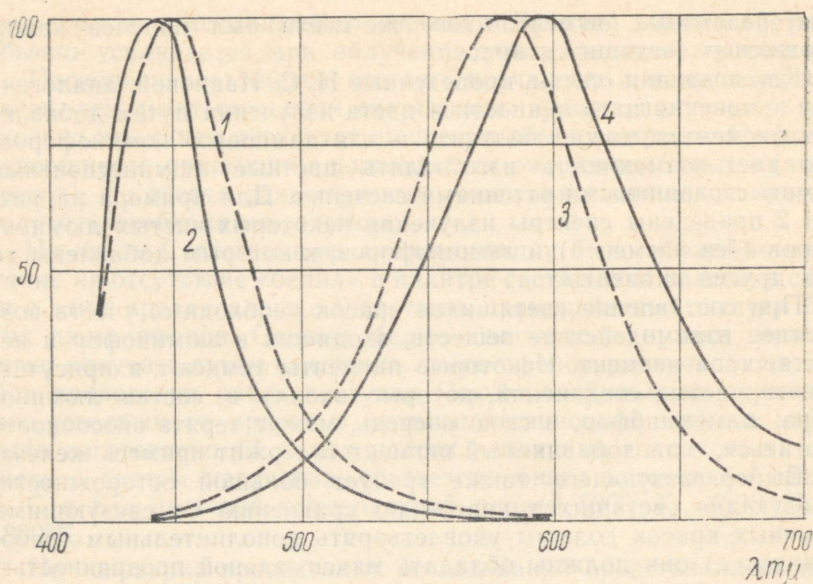


Рис. 1. Спектры излучения:

1 — люминофор ФК-III; 2 — люминофор ФК-III + основной синий К; 3 — люминофор ФК-104; 4 — люминофор ФК-104 + ганза желтая.

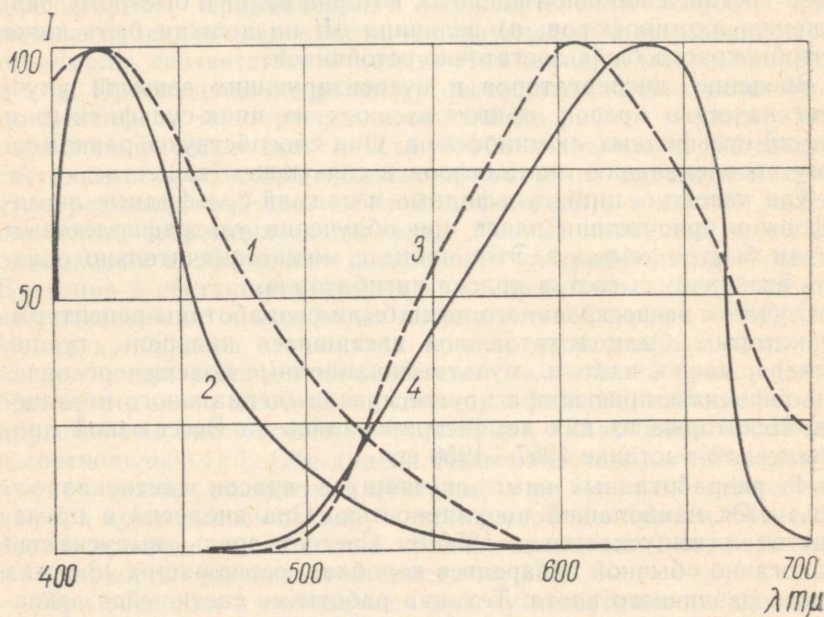


Рис. 2. Спектры излучения:

1 — люминофор CaWO_4 ; 2 — люминофор CaWO_4 + кобальт; 3 — люминофор $(\text{Zn}, \text{Be}) \text{SiO}_3$; 4 — люминофор $(\text{Zn}, \text{Be}) \text{SiO}_3$ + стронциановая желтая.

покрытия. В случае применения кристаллофосфоров перетир краски не допускается, поэтому кристаллофосфоры предварительно просеиваются сквозь тонкое сито и механически замешиваются с остальными компонентами краски. Прозрачные покрытия можно получить при помощи аэрографа. Краска, нанесенная таким образом на эскиз, выполненный разведенной тушью, производит впечатление легкости и прозрачности. Этот прием несколько напоминает принцип старинной английской акварельной техники, когда картина, выполненная в серых тонах, покрывалась сверху прозрачной акварелью.

Основное различие техники работы со светоакварелью от работы с обычной акварелью состоит в том, что в обычной акварели впечатление светлых тонов получается от оптического сложения цвета тонкого слоя краски и просвечивающей белой бумаги. В случае применения светоакварели, в противоположность обычной акварели, яркость краски увеличивается с толщиной слоя.

При желании работать в обычной для акварели технике надо предварительно загрунтовать бумагу светящейся белой краской и затем работать светящимися красками с введением в их состав обычных несветящихся пигментов. Такая техника возможна, но не характерна для светящейся живописи.

Обычный ватман является хорошей подложкой для прозрачного письма. Однако в большинстве случаев люминесценция более эффектна на темном фоне, кроме того темный фон отвечает основной тематике светящихся экранов ночных и вечерних видов.

Разработанные нами масляные краски и темпера применяются в случаях, когда желательны соответствующая техника пастозного письма и значительная толщина слоя. Масляная краска, кроме того, применяется для работы по глянцевой поверхности, например, по стеклу при комбинированных киносьемках или по целлулоиду в мультипликации.

Светящаяся пастель предназначена для живописного рисования по шероховатой бумаге. Техника работы со светящейся пастелью не отличается от обычной пастельной техники. Мелки могут применяться для рисования на стекле, освещенном ультрафиолетовым светом. Это дает возможность лекторам рисовать и писать, не включая общего освещения во время занятий при демонстрации диапозитивов.

В последние годы в искусстве возрождается старинная техника энкаустика. Светящаяся энкаустика также, несомненно, представляет интерес. Используя кристаллофосфоры, нанесенные аэрографом на восковую поверхность с последующим закреплением живописи путем подогрева поверхности, можно получить интересные эффекты.

Светящиеся присыпки разработаны нами двух видов. Первый вид представляет собой светящуюся целлулозную, шелковую или шерстяную пыль, которая наносится на липкую поверхность,

создавая впечатление определенной светящейся фактуры. Нанесенная в виде узоров на ткань она может создать светящиеся рельефные ткани типа пан-бархата и др. Подобные ткани могут найти широкое применение в театральных постановках.

Другой вид светящейся присыпки — это различной величины и конфигурации светящиеся крупинки пластмассы, прозрачные и не прозрачные. С помощью специального лака они могут наноситься на любую поверхность. Благодаря свойственной им люминесценции при дневном свете, прозрачные крупинки в проходящем свете имеют один оттенок, а в отраженном — другой, что создает исключительно интересную игру света благодаря различной ориентации отдельных крупинок.

В 1949 г. в связи с исследовательской работой, проводимой Ленинградской студией научно-популярных фильмов, нами по заданию студии были исследованы, уточнены и дополнены рецептуры изготовления флуоресцирующих тканей с помощью органических красителей. Для окраски тканей многими авторами рекомендуются: родамины марок С и Ж, эозин, флуоресцеин, риванол, нафтионовая кислота и гидростинин. Однако нафтионовая кислота, как показали опыты, очень быстро теряет яркость свечения и принимает бурый оттенок, который исключает возможность в дальнейшем возобновить окраску с первоначальной яркостью свечения, а гидростинин достать практически не удается.

Для получения тканей с голубой, фиолетовой и пурпуровой флуоресценцией нами были рекомендованы растворы флуоресцирующих красителей типа бланнофоров марки ВТ и марки Р. Подобные красители в настоящее время успешно применяются для придания белизны различным материалам взамен синьки (ультрамарина). Процесс окраски указанными красителями называется оптическим отбеливанием. Обработывая желтоватый материал или бумагу красителем, светящимся голубоватым, синеватым или фиолетовым цветом, подобрав оттенок, соответствующий дополнительному цвету к данному желтоватому оттенку, можно нейтрализовать его, получив при дневном свете впечатление исключительной белизны. Впервые для этой цели были применены *N*-бензолные производные диаминостильбендисульфоновой кислоты. В настоящее время промышленностью производятся специальные белые красители, флуотекс, целюмины, тинопалы, бланнофоры и др. Эти красители нами были использованы для изготовления декоративных светящихся тканей, которые при облучении ультрафиолетовым светом ярко светятся, оставаясь белыми при дневном свете. Рецептуры изготовления флуоресцирующих тканей различных цветов при помощи органических красителей нашли применение при выполнении светящихся костюмов для эстрадных танцевальных номеров.

Светящаяся гуашь была разработана для использования при комбинированных киносъемках, где она применялась для покры-

**Цветовые характеристики основных цветов из палитры светящихся
мультипликационных красок**

№ пп.	Цвет	Цветовые координаты		Доминир. длина волны (<i>mμ</i>)	Чистота (%)	Свет- лота (%)	Число цветовых порогов (по Джедду)
		X	Y				

а) Оригиналы при ультрафиолетовом облучении.

1	Красный	0,641	0,338	608	94	31	
2	Желтый	0,537	0,444	586	96	71	
3	Зеленый	0,315	0,639	552	94	65	
4	Голубой	0,616	0,259	486	54	41	

б) Воспроизведение на позитиве при съемке на пленке
ДС-2 при ультрафиолетовом облучении.

1	Красный	0,630	0,352	605	95	8	1
2	Желтый	0,550	0,407	592	90	33	1
3	Зеленый	0,367	0,488	568	70	13	5
4	Голубой	0,288	0,292	479	8	9	9

в) Воспроизведение на позитиве при съемке на пленке
ДС-2 при смешанном освещении.

1	Красный	0,615	0,357	604	92	10	3
2	Желтый	0,521	0,421	587	87	40	1
3	Зеленый	0,368	0,486	563	70	18	5
4	Голубой	0,262	0,324	490	20	17	7

г) Воспроизведение на позитиве при съемке на пленке
Агфа-колор при ультрафиолетовом облучении.

1	Красный	0,583	0,376	598	90	12	7
2	Желтый	0,444	0,444	578	75	58	6
3	Зеленый	0,318	0,480	546	58	35	3
4	Голубой	0,200	0,300	489	42	22	3

д) Воспроизведение на позитиве при съемке на пленке
Агфа-колор при смешанном освещении.

1	Красный	0,618	0,362	602	95	15	5
2	Желтый	0,482	0,446	582	84	59	4
3	Зеленый	0,428	0,485	572	82	70	8
4	Голубой	0,264	0,346	494	25	22	6

тия больших поверхностей. Она применялась также при первых люминесцентных съемках мультипликационных картин, но в дальнейшем потребовалась разработка специальных светящихся мульткрасок.

Специфическая особенность производства мультфильмов — изображение персонажей на ацетатной пленке, значительно усложняет съемку в ультрафиолетовом свете. Ацетатная пленка не стандартна, поэтому разные ее образцы светятся с различной интенсивностью под ультрафиолетовыми лучами. Глянцевая по-

верхность ацетатной пленки и ее способность легко сгибаться определяют весьма жесткие требования к мульткраскам. Поэтому мульткраски, кроме хорошей воспроизводимости на кинопленке, должны обладать хорошей адгезией к глянцевой поверхности, должны быть очень эластичны и иметь минимальный отлив при повышенной влажности. Обратимость красочного слоя, скорость высыхания, высокая укрывистость и хорошая растекаемость для них также обязательны.

Исследования точности цветопередачи красок, проведенные нами по заданию студии «Союзмультфильм», показали, что светящиеся краски позволяют получить на кинопленке цвета большей чистоты и насыщенности при значительно большей светлоте, чем обычные краски. Градация яркости полученной нами палитры мультипликационных красок обеспечивает возможность съемки с одной и той же экспозицией всех основных цветов. В таблице I приведены цветовые характеристики светящихся мультипликационных красок основных цветов и их воспроизведений на кинопленке.

Для сопоставления в таблице 2 приводятся те же характеристики для несветящихся мультипликационных красок.

Таблица 2

Цветовые характеристики основных цветов из палитры
несветящихся мультипликационных красок.

№ пп.	Цвет	Цветовые координаты		Деминир. длина волны (mμ)	Чистота (%)	Свет- лота (%)	Число цветовых порогов (по Джелду)
		X	Y				

а) Оригиналы при освещении люминесцентными лампами
ДС/300

1	Красный	0,486	0,344	604	52	9	
2	Желтый	0,422	0,474	573	78	31	
3	Зеленый	0,294	0,424	528	36	12	
4	Голубой	0,212	0,256	483	32	12	

б) Воспроизведение на позитиве (негативная пленка ДС-2)

1	Красный	0,597	0,361	602	89	6	7
2	Желтый	0,451	0,441	580	77	23	2
3	Зеленый	0,338	0,440	573	5	17	4
4	Голубой	0,354	0,335	499	8	10	9

На основе некоторых органических соединений, обладающих флуоресценцией, нами разработана технология изготовления декоративных красок, светящихся при дневном свете (ФДК). Эти краски обладают большей яркостью и чистотой цвета, чем обычные краски, благодаря их способности не только отражать видимые лучи, характеризующие их окраску, но и превращать

Наименование краски	При облучении ультрафиолетовым светом 600 $\mu\text{вт}/\text{см}^2$					При дневном свете 1500 лк					
	Цветовые координаты		λ ($m\mu$)	Р (%)	Яркость (аб)	Цветовые координаты		λ ($m\mu$)	Р (%)	Свет-лота	Яркость (аб)
	X	Y				X	Y				
Красная ФДК «Fluorink» Red Пигмент Red «L» Люмоген оранжево-красный Красная светоакварель ФК-101	0,665	0,323	615	97	693	0,585	0,382	596	93	0,409	603
	0,655	0,329	612	95	343	0,610	0,333	609	86	0,295	435
	0,642	0,344	607	96	522	0,600	0,338	607	85	0,400	592
	0,614	0,324	612	84	45	0,510	0,238	495	58	0,205	301
	0,660	0,318	618	94	253	0,472	0,334	605	51	0,260	383
	0,626	0,328	612	89	179	—	—	—	—	—	—
Plakatfarbe Gelbe № 606 «Fluorink» Orange «L» Пигмент Orange 200/OL Оранжевая ФДК Оранжевая светоакварель	0,531	0,437	586	94	506	0,530	0,416	588	90	0,654	962
	0,556	0,429	588	97	1060	0,560	0,406	591	93	0,740	1080
	0,569	0,415	590	97	745	0,563	0,394	593	92	0,597	880
	0,567	0,415	590	96	760	0,566	0,396	593	93	0,582	858
	0,570	0,401	592	94	462	0,411	0,450	574	69	0,764	1125
Лимонно-желтая ФДК Пигмент Yellow «L» 200/YL Люмоген желтый Желтая светоакварель	0,380	0,585	562	95	1210	0,431	0,505	571	90	1,030	1520
	0,314	0,608	552	90	1065	0,401	0,512	568	86	0,953	1400
	0,385	0,587	562	96	945	0,415	0,506	569	87	0,930	1370
	0,395	0,519	566	86	462	0,362	0,446	566	64	0,770	1135
Синяя ФДК Темно-синяя ФДК Plakatfarbe Blau № 618 Синяя светоакварель «Fluorink» Blaue	0,147	0,055	464	65	156	0,175	0,189	478	39	0,228	336
	0,151	0,047	462	65	112	0,163	0,125	472	42	0,106	156
	0,157	0,113	471	45	42	0,200	0,306	489	40	0,181	267
	0,143	0,063	468	68	67	0,190	0,184	475	30	0,161	238
	0,151	0,040	460	70	77	0,184	0,207	580	36	0,236	348
Эталонная магнелиевая пластинка	—	—	—	—	—	0,302	0,330	490	10	1,000	1470

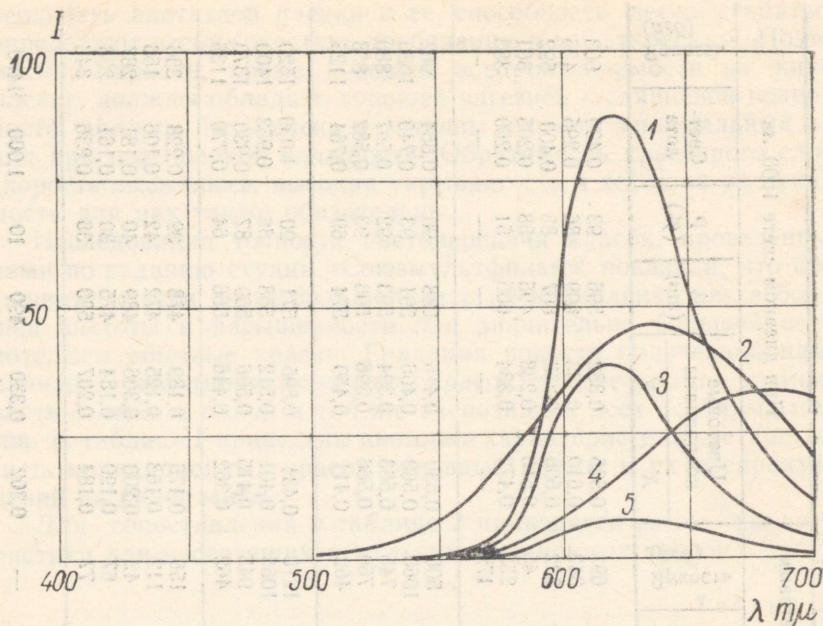


Рис. 3. Спектры излучения, полученные при одинаковых условиях возбуждения:

1 — ФДК красная; 2 — люминофор ФК-102; 3 — Pigment Red «L»; 4 — люминофор ФК-101; 5 — люмоген оранжево-красный.

поглощенную часть дневного света (более коротких длин волн) в люминесценцию того же цвета. Сопоставление спектральных и яркостных характеристик близких по цвету излучения флуоресцирующих декоративных красок (ФДК), люмогенов, люминофоров и светящихся красок, изготавливаемых иностранными фирмами, показало, что в ряде случаев наилучшими являются краски ФДК (см. таблицу 3 и рис. 3—6). Так, например, из красных выкрасок наибольшей яркостью обладает новая флуоресцирующая краска ФДК. Она почти в три раза ярче светоакварели, превосходя ее также и по чистоте света. Худшие показатели оказались у люмогена оранжево-красного, чистота цвета свечения которого оказалась на 13% ниже, а яркость в 8 раз меньше, чем для краски ФДК. Синяя краска ФДК по яркости также превосходит все другие светящиеся краски. Желтая краска ФДК не уступает по спектральным и яркостным характеристикам английской светящейся краске Pigment Yellow «L» 200/YL. Несколько худшие характеристики — у желтой декоративной краски.

Благодаря хорошим спектральным и яркостным характеристикам, а также невысокой стоимости, новые флуоресцирующие краски ВНИСИ (ФДК) найдут широкое применение при выпол-

нении различных декоративных работ. Они позволяют использовать во многих случаях значительно большую подсветку без особой потери контраста изображения. Они могут применяться также в смеси с люминофорами. При таком смешении значительно улучшаются насыщенность цвета и яркость люминофоров, а у флуоресцирующих красок повышается укрывистость.

На театральных сценах светящиеся краски используются с 1908 г. Впервые они были употреблены для изображения призраков в спектаклях «Синяя птица» в МХАТ'е и «Леди Макбет» на арене Ленинградского цирка. Костюмы «призраков» покрывались светящимися составами, обладающими длительным послесвечением. Облученные за кулисами ультрафиолетовым светом эти костюмы при появлении на затененной сцене создавали соответствующее впечатление благодаря холодному зеленоватому или голубоватому свечению. С появлением большого ассортимента светящихся составов возможности применения их на сцене расширились.

С 1939 г. по инициативе Д. Н. Лазарева началось использование светящихся красок при оформлении сказочных фантастических сюжетов. Облучение ультрафиолетовым светом производилось по ходу спектакля скрытыми на сцене источниками. В эффектной сцене поединка Иванушки и светящегося Змея

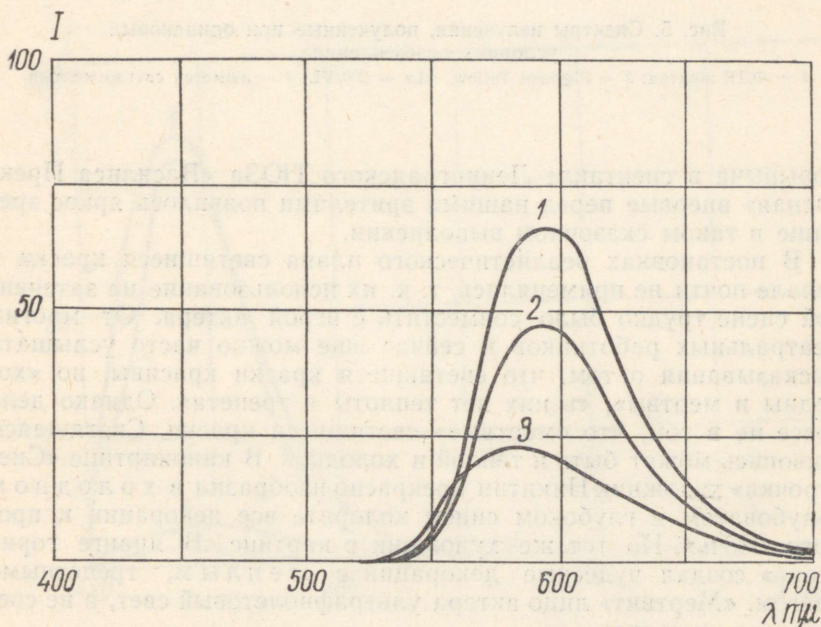


Рис. 4. Спектры излучения, полученные при одинаковых условиях возбуждения:

1 — Fluorink Oil bound-Orange L; 2 — ФДК оранжевая; 3 — Plakattfarbe Sorte 600 gelbe N6000.

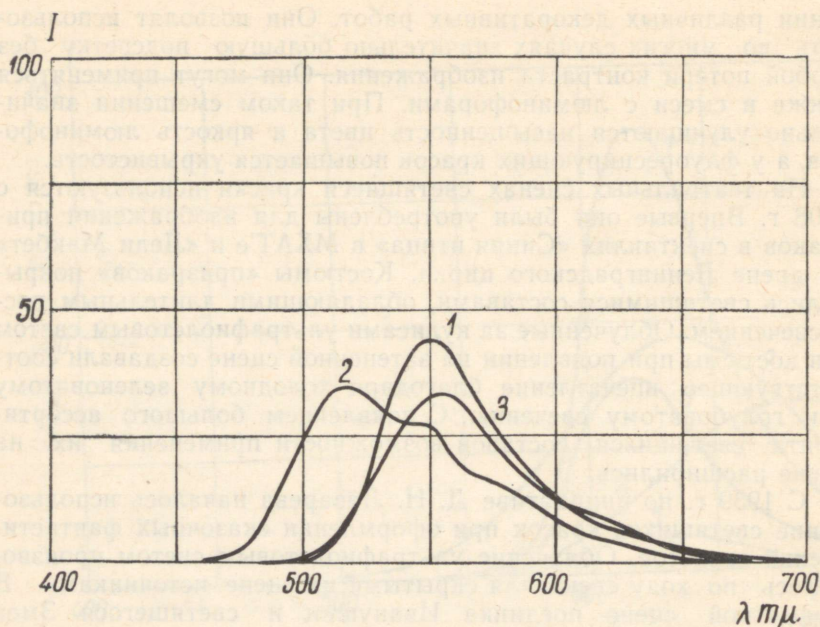


Рис. 5. Спектры излучения, полученные при одинаковых условиях возбуждения:

1 — ФДК желтая; 2 — Pigment Yellow «L» — 200/VL; 3 — люмоген светло-желтый.

Горыныча в спектакле Ленинградского ТЮЗа «Василиса Прекрасная» впервые перед нашими зрителями появилось яркое зрелище в таком сказочном исполнении.

В постановках реалистического плана светящиеся краски в начале почти не применялись, т. к. их использование на затененной сцене трудно было совместить с игрой актера. От многих театральных работников и сейчас еще можно часто услышать высказывания о том, что светящиеся краски красивы, но «холодны и мертвы», «в них нет теплоты и трепета». Однако дело вовсе не в том, что «мертвые» светящиеся краски. Светящаяся живопись может быть и теплой и холодной. В кинокартине «Снегурочка» художник Никитин прекрасно изобразил в холодном голубоватом и глубоком синем колорите все декорации к прологу «Ночь». Но тот же художник в картине «В яранге горит огонь» создал чудесные декорации с «теплым, трепетным» очагом. «Мертвит» лицо актера ультрафиолетовый свет, а не светящаяся живопись.

Главным действующим лицом на сцене является актер с его игрой и мимикой. Поэтому лицо актера должно быть достаточно хорошо освещено видимым светом, вместе с тем светящиеся

краски без добавления пигмента эффектны только в темноте. Лицо актера в ультрафиолетовом свете сильно искажается: волосы выглядят тусклыми; глаза из-за флуоресценции глазных средин — бесцветными, невыразительными; зубы неестественно светятся, а при наличии искусственных зубов рот кажется беззубым. К нам обращались актеры, огорченные этим последним обстоятельством, с просьбой помочь им в этой беде. За рубежом актерам и лекторам, имеющим дело с ультрафиолетовым облучением, зубные протезы изготавливают из специальной пластмасы, флуоресцирующей аналогично естественным зубам.

Использование люминофоров с примесью обычных красок в качестве наполнителей позволило практиковать белую подсветку. Однако применение люминофоров в смеси со случайными обычными красками с неизвестными пигментом и связующим ведет к большим потерям яркости их свечения. Для сохранения необходимого контраста изображения требуется соответствующее повышение мощности ультрафиолетового облучения. Большая же мощность ультрафиолетового света создает тяжелые условия для актера, вызывая ощущение дымки в глазах и сильно озонируя воздух.

Отличие цвета свечения люминофоров при облучении ультрафиолетовым светом от их цвета при обычном освещении позво-

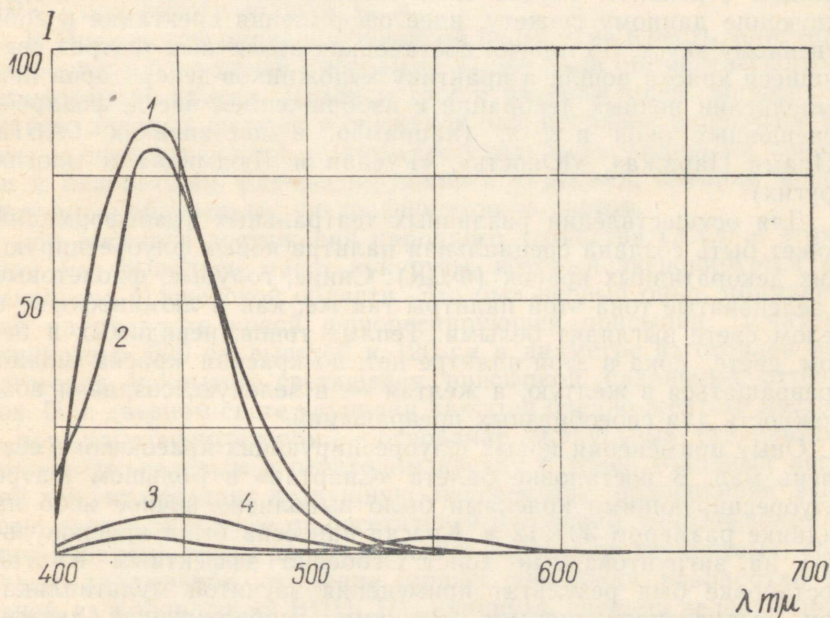


Рис. 6. Спектры излучения, полученные при одинаковых условиях возбуждения:

1, 2 — ФДК синие; 3 — Plakatfarbe Sorte 600; Blau № 618;
4 — Fluorink Oil bound-Blue.

ляет художнику осуществлять необходимые в некоторых случаях театральные трансформации. Если декорация написана светящимися красками поверх обычной живописи, то, включая ультрафиолетовый и выключая белый свет, можно получить полную перемену декорации. Отдельные элементы декорации, выполненные светящимися красками, при облучении ультрафиолетовым светом могут преобразовать сцену, исключив всё второстепенное и концентрируя внимание на главном. При этом могут появляться, оживать и, наоборот, исчезать отдельные детали декорации. В постановке МХАТа «12 месяцев» на светлом фоне снежного пейзажа, выполненного обычными красками, изображены листья и ягоды земляники, выполненные светящимися красками. При обычном освещении листья и ягоды выглядят белыми, как окружающий фон, а при облучении ультрафиолетовым светом происходит сказочное превращение: появляются красные ягоды и зеленые листья. В постановке «Чудо-птица» в театре им. Станиславского на тюлевом занавесе изображена невидимая при обычном свете Жар-птица. При включении источников ультрафиолетового света она неожиданно появляется, сверкая всеми цветами радуги.

Подобные эффекты стали часто использоваться художниками, которые проявляют много изобретательности, применяя в каждом отдельном случае свои собственные приемы, соответствующие данному сюжету, идее оформления спектакля и собственному вкусу. Во многих постановках различных театров светящиеся краски вошли в практику художников-декораторов при выполнении ночных декораций с изображением звезд, фонарей, освещенных окон и т. п. (например, в постановках ГАБТа «Пламя Парижа», «Юность», «Руслан и Людмила» и многих других).

Для осуществления различных театральных трансформаций может быть создана специальная палитра новых флуоресцирующих декоративных красок (ФДК). Синие, голубые, фиолетовые и зеленоватые тона этой палитры так же, как и люминофоры, в белом свете выглядят белыми. Теплых тонов, невидимых в белом свете, пока в этой палитре нет, но красная краска может превращаться в желтую, а желтая — в зеленую, создавая возможность для своеобразных превращений.

Опыт применения новых флуоресцирующих красок пока еще очень мал. В постановке балета «Спартак» в Большом театре флуоресцирующими красками было выполнено ночное небо на заднике размером 30×12 м. Краска нанесена была краскопультом на загрунтованный холст. Особенно эффектным в этой постановке был результат применения заснятой мультипликации, выполненной новыми красками, изображающей движущиеся массы повстанцев, с факелами идущих с вершины горы, которая демонстрировалась напросвет в прорези горы Везувий.

На эстраде флуоресцирующие краски были впервые применены при выполнении светящегося ледяного ковра и при оформлении отдельных танцевальных номеров. В 1948 г. на ледяной площадке Дворца спорта в Лужниках нами выполнены работы по созданию светящегося ледяного ковра для фигурного катания. Предварительно были проведены испытания поведения новых флуоресцирующих красок при низкой температуре. Краски, нанесенные на лед кистью и набрызгом, были залиты водой и заморожены при температуре -4°C . Результат опытов оказался вполне удовлетворительным. Однако для выполнения светящегося узора на льду была предоставлена только одна ночь перед концертом. Размер ледяного поля составлял 24×25 м общей площадью 600 кв. м, поэтому узор был выполнен при помощи заранее приготовленных светящихся аппликаций. Белая рулонная бумага площадью около 140 кв. м предварительно была окрашена в лаборатории флуоресцирующими красками различных цветов. Ледяное поле было покрыто синей гуашью при помощи краскопульта. Затем светящиеся аппликации были разложены в виде яркого узора на темном фоне, по периметру площадки был нанесен светлый кант и размыт по направлению к центру. Толщина ледяного покрова над рисунком составляла 2 см. Облучение ультрафиолетовым светом производилось при помощи 8 приборов «Гостеасвета» с ртутными лампами типа ПРК-7 при высоте подвеса 15 м.

В Московском цирке в юбилейной программе в честь 40-летия Октября и в новогодней программе также были применены флуоресцирующие краски. Ледяной грот с изображением морозных узоров, ледяных сосулек и снежинок был исполнен набрызгом и кистью невидимыми при дневном свете голубыми, лиловыми, синими и беловатыми флуоресцирующими красками, которые ярко светились, облученные ультрафиолетовым светом.

На выставке достижений народного хозяйства СССР в этом году был выполнен макет кукурузы, который экспонируется в павильоне Московской области. Это был первый опыт применения на практике новой флуоресцирующей присыпки. Початок «кукурузы» 600 см высотой и 120 см в диаметре изготовлен из оргстекла, покрытого светящейся присыпкой различных оттенков. При дневном свете крупинки кажутся бледно-желтого цвета, а при ультрафиолетовом — основание «кукурузы» становится ярко-желто-зеленым с переходом сверху в более холодный легкий тон, что создает воздушную перспективу, подчеркивая высоту макета. Скрытые от посетителей источники ультрафиолетового и белого света, размещенные у основания «кукурузы», создают динамичное освещение (проект освещения разработан в одной из лабораторий ВНИСИ): кукуруза, сначала зеленая при облучении ультрафиолетовым светом, постепенно желтеет при добавлении белого света и превращается в светло-желтую при одном белом свете. Игра света в прозрачных крупинках при-

сыпки усиливается благодаря дополнительному цветному освещению. Свет струится, искрится, переливается.

Подобное сценическое зрелище с еще большим успехом можно получить при выполнении, например, волшебного каменного цветка, интересная форма которого усилила бы впечатление.

В павильоне Высшей школы на той же выставке выполненные из толстого органического стекла синусоиды (различной высоты — от 25 до 40 см) окрашены с двух сторон разработанными нами флуоресцирующим лаком. Динамичное освещение снизу в торец создает впечатление бегущего луча.

Оба эти принципа применения прозрачных светящихся присыпок и пластмасс, с освещением их в торец или скользящим лучом, можно использовать при выполнении декоративных светильников для театральных фойе, при оформлении карнавалов и т. п. Из подобных светящихся присыпок может быть создана интересная светящаяся мозаика.

В киностудиях светящиеся краски стали применяться сравнительно недавно, но тем не менее с каждым годом художники и операторы стараются решить с их помощью все новые, более сложные задачи. Впервые при киносъемках светящиеся краски были применены в 1947 г. Московской студией научно-популярных фильмов в картине «Холодный свет». По просьбе постановочной группы этой картины нами были выполнены эскизы с изображением глубоководных светящихся рыб, светлячков и сказочной Жар-птицы. В том же году в Ленинградской студии научно-популярных фильмов оператором Лаврентьевым и режиссером Клушанцевым была проведена съемка черно-белых картин «Метеориты» и «Марс». Макеты солнца, планет и млечного пути были выполнены светящимися красками и снимались в ультрафиолетовом свете. Вспомогательные конструкции и механизмы, находясь в поле зрения аппарата, не мешали съемке, так как оставались невидимыми в черном свете. В студии Ленфильм светящиеся краски были применены при съемке фона для рирпроекции и комбинированных кадров в ультрафиолетовом свете с помощью блуждающей маски. В 1949 г. по заданию Ленинградской студии научно-популярных фильмов, проводившей исследовательскую работу по применению светящихся красок при киносъемках (при съемке кино-картины «Вселенная»), нами была разработана палитра светящихся гуашевых красок. Гуашевые светящиеся краски были применены затем при съемке комбинированных кадров также и на многих других студиях.

На студии «Мосфильм» первые комбинированные съемки с применением светящихся красок были произведены в картине «Веселые звезды». В комбинированных кадрах снимался макет вечернего вида Москвы, выполненный с помощью светящихся красок, который служил затем фоном для натурной съемки игровых сцен. В кинокартине «Авицена» производства Ташкентской

студии киносъемка солнечного затмения была осуществлена при помощи светящихся красок. Подобных примеров применения светящихся красок при съемке комбинированных кадров можно перечислить очень много.

В 1950 г. студией «Союзмультфильм» была выпущена на экран кинокартина «Снегурочка». Это был первый рисованный фильм, снятый с применением светящихся красок. С их помощью удалось улучшить цветопередачу красок и осуществить получение различных световых эффектов. В прологе «Ночь» кинокартины «Снегурочка» вся декорация, построенная на голубом и синем колорите, в воспроизведении на киноплёнке приобрела блеклую, сероватую тональность. С помощью прозрачной люминесцентной краски, нанесенной аэрографом на готовый, исполненный обычными красками фон, удалось воспроизвести задуманное цветовое решение. Чтобы получить на экране иллюзию реальной яркости неба, при съемках рисованных кадров небо обычно приходилось изображать отдельно и, расположив на нижнем ярусе мультстанка, снимать с повышенной освещенностью. Покрывая светящейся краской небо, а затем прописывая весь пейзаж обычными красками, в разделах «заповедный и зачарованный лес» удалось получить иллюзию прозрачности, глубины и соответствующей яркости неба. Цветовое решение этих эпизодов строилось на широком применении светящихся красок. Иллюзия лунного освещения пейзажа достигалась изображением светящимися красками лунного света на элементах декорации. Прозрачная дымка голубоватого тумана изображалась прозрачной светящейся краской, пробегающие светлячки рисовались светящейся краской на пергаменте и снимались дополнительной экспозицией. Морозные узоры на декорации терема Снегурочки были выполнены светящимися красками по фону, написанному обычными красками, и снимались в сочетании с «прожегом». Костюмы сказочных образов Снегурочки, Весны и Мороза были значительно обогащены сверкающими украшениями, изображенными светящимися красками. Применение светящихся красок при съемке кинокартины «Снегурочка» затруднялось из-за отсутствия светящихся мульткрасок, предназначенных для рисования на целлулоиде, рациональных приборов для ультрафиолетового облучения мультстанка и специальных съемочных светофильтров.

Для решения этих задач была проведена исследовательская работа, и для лучшего освоения отдельных приемов применения светящихся красок при мультсъемках был разработан экспериментальный ролик с наиболее характерными фрагментами, выполненными при помощи светящихся красок.

Светящиеся мультипликационные краски нашли широкое применение при съемках многих кинокартин, например: «В яранге горит огонь», «Царевна лягушка», «Двенадцать месяцев», «Кошкин дом» и многих других.

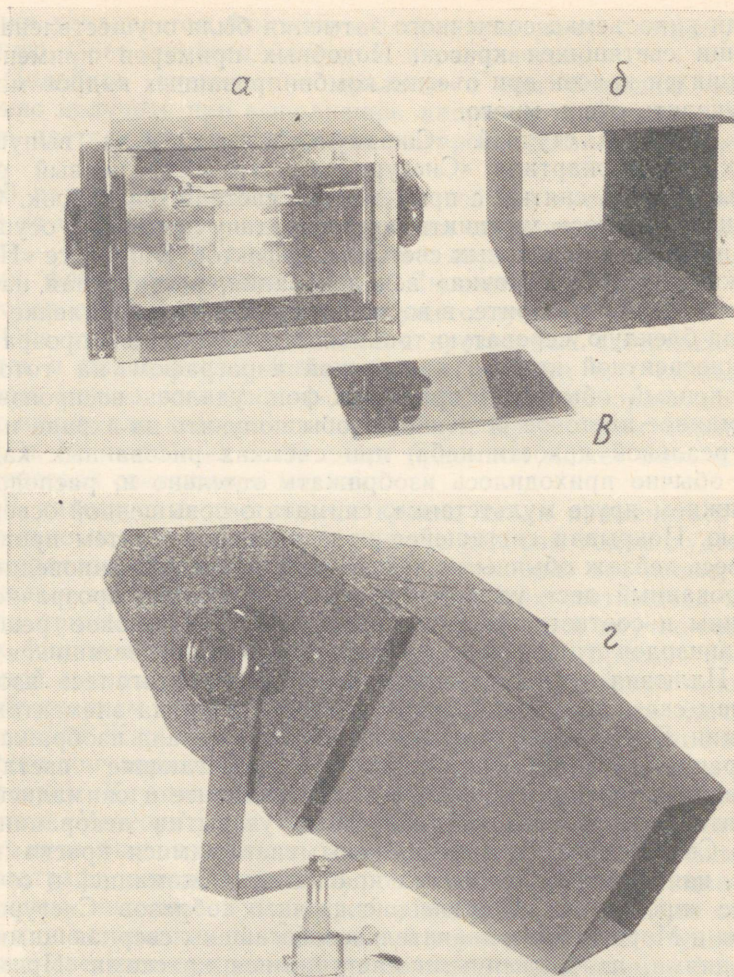


Рис. 7. Ультрафиолетовый светильник:
а — кожух; б — тубус; в — фильтр; г — общий вид.

С появлением новых флуоресцирующих декоративных красок ФДК появилась возможность проводить съемки с значительно большей белой подсветкой, а в некоторых случаях даже и при белом свете. Впервые эти краски были применены для киносъемок в нескольких фильмах, выпущенных студией «Союзмультфильм» в 1958 г. Низкая адгезия флуоресцирующих декоративных красок к ацетатной подложке затрудняла их применение в мультсъемках. Однако специально разработанные присадки помогли улучшить адгезию. В фильме «Красная шапочка»

флуоресцирующая красная краска была использована для изображения красной шапочки. Пробные съемки, проведенные оператором Астафьевым, показали, что красный цвет обычной мульткраски в воспроизведении на киноплёнке получается очень темным с кирпично-коричневым оттенком. Шапочка же, залитая новой флуоресцирующей краской и снятая при обычном освещении мультстанка люминесцентными лампами, в воспроизведении на киноплёнке получилась нужного, достаточно яркого красного цвета.

В кукольном мультипликационном фильме «Краса ненаглядная» кукла-дракон была раскрашена флуоресцирующими декоративными красками, благодаря которым она при ультрафиолетовом облучении казалась огненной.

В кукольном мультипликационном фильме «Северный дракон» производства Таллинской студии художественных фильмов новые флуоресцирующие краски использовались при съемке огня в кузнице, огненного неба при появлении дракона и лунного пейзажа.

В фильме «Кошкин дом» производства студии «Союзмультфильм» флуоресцирующие краски с незначительными добавками люминофоров (для достижения большей укрывистости) были использованы при изображении огня. Огонь, выполненный с помощью этих красок, получил особенно яркое, насыщенное воспроизведение на киноплёнке.

Проведенная в мультфильме экспериментальная работа позволила нам определить оптимальную облученность мультстанка для покадровой съемки в ультрафиолетовом свете и разработать рациональный малогабаритный светильник, удобный в эксплуатации (рис. 7). Лампа типа СВД-120А, помещенная в фокусе алюминиевого параболического отражателя, обеспечивает хорошую облученность станка. С помощью тубуса, который укрепляется на корпусе светильника перед выходным отверстием, осуществляется облучение только рабочей поверхности без засветки всей поверхности мультстанка. Замена ламп типа ПРК-7 в арматуре «Гостеасвета» указанными светильниками в значительной мере облегчает условия работы оператора и сокращает расход электроэнергии. Этот светильник может с успехом применяться и на сценах театров для местной подсветки небольших площадей. Его легко скрыть во многих деталях декорации, благодаря небольшому габариту.

В конце 1958 г. на студии художественных фильмов им. Довженко в Киеве снималась кинокартина «Лилея». Съёмочная группа этой картины решила применить светящиеся краски при съемках в павильоне эпизода «дно озера» с участием актеров в одну экспозицию. Это были совершенно новые условия цветной съемки, так как во всех случаях применения светящихся красок в «Союзмультфильме» и на других студиях проводилась только покадровая цветная съемка. Поэтому предварительно были про-

ведены экспериментальные съемки новых флуоресцирующих красок совместно с люминофорами на различных кинопленках в различных условиях освещения с различными съемочными светофильтрами. Флуоресцирующие краски были применены при окраске грунта и раковины, из которой появлялась русалка. Задник грота, размером 5×5 м, был расписан синими, голубыми и зелеными красками. Раковина снаружи была раскрашена оранжево-красными и пурпуровыми красками, а внутри — красками различных голубых оттенков. На платье, волосах и короне русалки, появляющейся из глубины раковины, светящимися красками были изображены яркие блики. Съемка этой сцены с применением флуоресцирующих красок подтвердила возможность получения нужного эффекта чистых, ярких красок на кинопленке при съемке с нормальной частотой 24 кадра в секунду.

Приведенный выше перечень применений светящихся красок в театрах и киностудиях далеко не исчерпывающий и, без сомнения, возможности их использования значительно шире, чем нам удалось показать в данной статье.

СОДЕРЖАНИЕ

Ф. Д. К л е м е н т	О люминесценции и ее применениях	3
М. Д. Г а л а н и н.	Люминесцентные счетчики ядерных излучений . . .	12
И. Н. О р л о в.	Электролюминесценция и перспективы ее применения . .	20
А. В. К а р я к и н.	Люминесцентная дефектоскопия в машиностроитель- ной промышленности, сельском хозяйстве и медицине	36
Ф. М. П е к е р м а н.	Люминофоры для люминесцентных ламп высокого и низкого давления	47
Н. В. Г о р б а ч е в.	Применение люминесценции в архитектурном освещении	59
М. И. А г р а н я н.	Светящиеся краски и их применение в театрах и кино- студиях	72

ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Должно быть
16	23 сверху	-частица	α -частица
25	23 сверху	$B = A_{\text{exp}} [-(E_0/E)^{1/2}]$	$B = A_{\text{exp}} [-(E_0/E)^{1/2}]$
55	15 снизу	$(\text{Sr}, \text{Ca})_3 (\text{PO}_4)_2\text{-Tl}$	$(\text{Sr}, \text{Ca})_3 (\text{PO}_4)_2\text{-Tl}$
56	1 снизу	542	642
58	4 снизу	JoSA	JOSA
62	11 снизу	с осветительные	и осветительные
62	4 снизу	изменения	измерения
65	5 снизу	применения различных в декоративном	применения в декоратив- ном

Цена 2 р. 85 к.

