

# СВЕТОТЕХНИКА

ОРГАН МИНИСТЕРСТВА  
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ  
И ПРИБОРОСТРОЕНИЯ СССР  
И ЦЕНТРАЛЬНОГО ПРАВЛЕНИЯ  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА ЭНЕРГЕТИКОВ  
И ЭЛЕКТРОТЕХНИКОВ им. АКАДЕМИКА  
Г. М. КРЖИЖАНОВСКОГО

6 1990

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

Издается

Москва

с января 1932 года

Энергоатомиздат

УДК 621.32:658.562

## О ПРЕДЕЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЯХ ПОВЫШЕНИЯ СВЕТОВОЙ ОТДАЧИ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА

М. В. ФОК, доктор физ.-мат. наук

Физический институт им. П. Н. Лебедева Академии наук СССР

В настоящее время искусственный видимый свет получают почти исключительно за счет электрической энергии. Использующие химическую энергию старые ИС (свечи, керосиновые и газокалильные лампы, не говоря уж о лучине) все дальше уходят в прошлое, новые — хемилюминесцентные — еще не дошли до того уровня, когда видны их принципиальные возможности. Поэтому будем рассматривать преобразование в свет только электрической энергии.

Уже почти полвека известно, что термодинамический предел КПД преобразования электрической энергии в световую превышает 100 %. Качественные рассуждения, приводящие к этому выводу, весьма просты. Как говорил на лекциях известный физик О. Д. Хвольсон, второй закон термодинамики означает просто, что порядок надо непрерывно поддерживать, а беспорядок устанавливается сам собой. Термодинамика запрещает уменьшение энтропии (меры беспорядка, как ее иногда называют) изолированной системы. Однако она не запрещает уменьшение энтропии какой-либо части системы, если энтропия другой, взаимодействующей с ней, части системы возрастает достаточно быстро.

Наша система состоит из светящегося тела, потока входящей в него электрической энергии и потока испускаемого им света. Энтропия электрической энергии близка к нулю (она в точности равна нулю для строго постоянного, а также строго периодического тока). Энтропия же света отлична от нуля и тем больше, чем шире его сплошной спектр. Поэтому если вся электрическая энергия превращается в свет, то энтропия системы в целом возрастает. Но согласно термодинамике она может и не возрастать, лишь бы не убывала. Следовательно, в процессе свечения энтропия какой-то части системы (в данном случае — светящегося тела) может несколько убывать. Другими словами, тело может охлаждаться, вкладывая часть своей тепловой энергии в энергию испускаемого им света. Разумеется, закон сохранения энергии должен при этом выполняться.

Но термодинамика дает лишь «право» на КПД люминесценции, больший 100 %, не указывая, как его можно получить на опыте. Лишь знание молекулярного механизма позволяет найти пути достижения высокого КПД преобразования электрической энергии в световую. Посмотрим с этой точки зрения, как обстоит дело с современными

источниками света. Начнем с газоразрядных ламп, причем ограничимся ЛЛ, дающими белый или близкий к нему свет со сплошным спектром, в котором нет или почти нет линейчатой составляющей, ибо только он обеспечивает приемлемую цветопередачу. Для краткости мы назовем его «белым», уточняя, насколько его спектр соответствует строгому определению.

В люминесцентных лампах происходит многократное преобразование энергии: энергия электрического поля — кинетическая энергия электронов — энергия возбужденных атомов — кванты ультрафиолетового света — энергия электронно-дырочных пар — энергия возбужденных центров свечения — кванты видимого света. Итого 6 преобразований, на каждом из которых часть энергии теряется. Сверх того, энергия теряется еще и в балластном дросселе, о чем обычно «забывают», рекламируя эффективность люминесцентного освещения.

Если не говорить о дросселе, то в современных люминесцентных лампах наиболее велики потери при преобразовании ультрафиолетовых квантов в видимые. Механизм люминесценции современных ламповых люминофоров таков, что в лучшем случае каждый ультрафиолетовый квант дает по одному кванту видимого света. Но линии 185 и 254 нм, преобладающие в спектре разряда в применяемой ныне смеси газов, лежат настолько далеко от видимой области, что возбуждаемая ими фотoluminesценция не может иметь высокого энергетического выхода даже при квантовом выходе, равном 100 %. Если принять для грубой оценки, что спектр видимого света простирается от 400 до 700 нм, то середина его придется на 550 нм, что в 3 раза больше 185 нм и в 2 с лишним раза больше 254 нм. Это значит, что при возбуждении «белой» фотoluminesценции теряется 2/3 энергии квантов 185 нм и больше половины энергии квантов 254 нм. Соотношение интенсивностей этих двух линий зависит от условий разряда, но в современных лампах низкого давления их интенсивности одного порядка. Поэтому потери при возбуждении фотoluminesценции люминофора в таких лампах составляют примерно 60 %. К этим потерям добавляются потери при возбуждении свечения разряда, потери на не полное поглощение ультрафиолетового света и реабсорбцию света люминесценции, а также потери на безизлучательные

рекомбинации и неактивное поглощение в люминофоре. Даже если ценой величайших усилий свести эти потери в сумме всего к нескольким процентам, получится, что в свет может превратиться чуть больше трети подводимой к лампе энергии. Если принять энергетический эквивалент белого света равным 320 лм/Вт, получим предельную световую отдачу 110—120 лм/Вт, что не намного превышает световую отдачу лучших современных образцов.

Даже если при уточнении оценки получится не 120, а 140 лм/Вт, все равно ясно, что возможности увеличения светоотдачи люминесцентных ламп в их современном виде почти исчерпаны. Этим и объясняется замедление прогресса в последние десятилетия. Ни изменение изотопного состава ртути, ни улучшение галофосфатных люминофоров скачка светоотдачи не дадут. Надо искать нетривиальные пути.

Поскольку основные потери происходят при возбуждении фотolumинесценции, мыслимы два пути их уменьшения при сохранении принципа конструкции лампы.

1. Применение вместо паров ртути другой газовой смеси, не дающей коротковолнового УФ излучения, но обеспечивающей не меньший КПД преобразования электрической энергии в световую. Например, если бы удалось найти газовую смесь, испускающую свет с длиной волны не короче 300 нм и с центром тяжести спектра около 350 нм, то потери на преобразование УФ света в видимый снизились бы с 60 до 34%, т. е. почти вдвое.

2. Применение люминофоров, в которых центры свечения имеют промежуточный уровень, такой, что переходы с верхнего возбужденного уровня на промежуточный и с промежуточного на основной давали бы по кванту видимого света. Если верхний уровень может быть возбужден квантами 254 или 185 нм, то энергетический выход будет вдвое больше, чем при испускании одного кванта. Здесь, однако, надо иметь в виду, кванты 254 и 185 нм должны поглощаться разными центрами и по всей вероятности эти центры удастся создать лишь в разных люминофорах. Заметим, что само по себе испускание двух длинноволновых квантов при поглощении одного коротковолнового уже наблюдалось, причем суммарный квантовый выход с учетом и резонансного испускания коротковолнового кванта достигал 1,5—1,7. Однако в этих опытах коротковолновый квант был видимым, а длинноволновые — инфракрасными.

Такое явление наблюдалось, например, при возбуждении видимым светом редкоземельных антистоксовых люминофоров, предназначенных для сложения энергий двух инфракрасных квантов и получения в результате видимого света. Интересующий нас процесс противоположен этому и не требует некоторых условий, необходимых для эффективного сложения энергий квантов. В частности, слабость взаимодействия с фотонами возбужденных центров свечения, которая проявляется в узости линий, нужна только для прямого процесса, т. е. для сложения двух малых квантов в один большой. Обратный процесс может быть эффективен и при широких полосах свечения и поглощения и потому может происходить не обязательно в люминофорах с редкоземельными активаторами.

Рассмотрим теперь ЛН. Традиционный путь повышения их световой отдачи — увеличение температуры тела накала, но для вольфрама этот путь пройден уже почти до конца. Можно использовать другие материалы. Однако, если спектр их коэффициента поглощения будет столь же широкий, как у вольфрама, они должны быть чрезвычайно термостойкими. Стремление повышать температуру вольфрамового тела накала неявно основано на том, что спектр его излучения близок к спектру черного тела. Как известно, для спектра черного тела имеется температурный оптимум, при котором наибольшая доля излучения приходится на видимую область. Для интервала 400—700 нм этот оптимум лежит при 7000 К, и для видимого излучения составляет около 40 %. К нему-то все и стремятся, как к недостижимому миражу, хотя сам этот желанный предел не так уж и высок. Между тем, и здесь есть нетрадиционный путь. Стоит вспомнить про закон Киргоффа, согласно которому долю инфракрасного излучения можно уменьшить, сделав тело накала из материала, прозрачного в инфракрасной области.

Таким материалом может быть широкозонный полупроводник, причем, как показывает расчет, достаточно, чтобы он выдерживал температуру 2000—2500 К и тогда он сможет конкурировать по световой отдаче с черным телом

при 7000 К. Опыты с гексагональным карбитом кремния показали, что при температуре 1300—1400 К световая отдача пластинки толщиной 40 мкм, приблизительно, на порядок выше, чем у вольфрамовой нити при той же температуре. Это показывает, что эффект может быть весьма значительным. Карбид кремния оказался недостаточно стойким: при 2100 К, когда по расчету он должен был иметь наименьшую световую отдачу, он разлагался через несколько минут. Но широкозонных полупроводников известно много и иначе не следует, что среди них нет ни одного с подходящими оптическими свойствами и более термостойкого, чем карбид кремния.

При разработке полупроводникового тела накала полезно руководствоваться следующими соображениями.

1. Поскольку ширина запрещенной зоны полупроводников уменьшается при нагревании, длинноволновая граница собственного поглощения полупроводника, подходящего для тела накала, должна находиться не на длинноволновом краю видимой области, а в ее середине или даже вблизи коротковолнового края. Если же она лежит в УФ области, то полупроводник надо легировать, создав в нем примесные центры окраски, сдвигающие поглощение в длинноволновую область. Пути здесь могут быть разными, а цель одна: при рабочей температуре поглощающая способность в видимой области должна быть высокой и резко обрываться при переходе к ИК области.

2. Полупроводник надо легировать мелкими (до 0,3 эВ) донорами или акцепторами в таком количестве, чтобы при исходной температуре, равной температуре окружающей среды, его электропроводность была бы достаточна для начала разогрева и в процессе достижения рабочей температуры электропроводность возрастала бы настолько медленно, что рост джоулева тепла при повышении температуры отставал бы от роста лучиспускания, и температура тела накала была бы устойчивой. В противном случае потребуется балластное сопротивление, что, конечно, нежелательно.

3. Полностью избежать излучения в ИК области невозможно, ибо всегда остается поглощение, а значит, и излучение, обусловленное теми самыми электронами (или дырками), которые обеспечивают электропроводность. Это накладывает ограничение на уменьшение коэффициента поглощения материала, из которого сделано тело накала, но не на поглощающую способность сделанного из него тела. Поглощающую способность можно уменьшать, уменьшая толщину тела накала.

Теоретические оценки показывают, что с учетом всех потерь на теплопроводность, конвекцию, УФ и ИК излучение можно ожидать КПД полупроводниковой ЛН около 20—30 %, т. е. световую отдачу 60—90 лм/Вт. Такие лампы могут конкурировать с современными ЛЛ даже по фактической световой отдаче, ведь у них нет потерь в балластном дросселе. К тому же потери на теплопроводность и конвекцию можно уменьшить, сделав колбу лампы с двумя стенками, наподобие сосуда Дьюара.

Как видно, традиционные источники белого света со сплошным спектром еще далеко не исчерпали своих возможностей. Но есть еще и нетрадиционные ИС, которые пока используются не для освещения, а для отображения информации. Для освещения они еще не годятся из-за низкого КПД, но именно они имеют шансы близко подойти к термодинамическому пределу. Речь идет об инжекционных электролюминесцентных ИС. Инжекционная электролюминесценция отличается тем, что избыточная энергия электронов и дырок существует в форме потенциальной энергии, которую они могут израсходовать только в результате рекомбинации. Поэтому при разработке инжекционных ИС главный вопрос состоит в том, как избежать безизлучательных рекомбинаций, несмотря на сильное легирование  $p$ - и  $n$ -областей полупроводника. Отсутствие безизлучательных рекомбинаций, однако, еще недостаточно для получения высокого КПД, ибо он зависит также и от приложенного напряжения. КПД будет близок к 100 %, если к  $p$ — $n$ -переходу приложена такая разность потенциалов, что, пройдя ее электрон (или дырку), приобретает энергию, равную энергии испускаемых квантов. На опыте слабое свечение наблюдается даже тогда, когда приобретаемая носителем заряда энергия несколько меньше энергии испускаемых квантов. Это значит, что часть энергии они получают от тепла. Однако в  $p$ — $n$ -переходах, испускающих видимый свет, пока не удалось избавиться от без-

излучательных рекомендаций, так что в целом их КПД мал. Хорошие кристаллофосфоры, которые как раз отличаются почти полным отсутствием безизлучательных рекомбинаций, как правило, имеют очень большое удельное сопротивление. В то же время обе части  $p-n$ -перехода должны быть низкоомными, чтобы избежать омических потерь. В обычных полупроводниковых диодах имеется лишь тонкая высокоомная область в середине  $p-n$ -перехода, в которой рекомбинации идут по излучательному пути. Для получения высокого квантового выхода инжекционной электролюминесценции эту область следует растянуть, изготовив  $p-i-n$ -переход. Если толщина  $i$ -области несколько больше длины диффузии инжектируемых в нее носителей заряда, то основной поток рекомбинаций будет протекать через расположенные в ней центры свечения. Для ИК излучателей это уже достигнуто. Современная технология выращивания эпитаксиальных пленок в принципе позволяет создать в широкозонных полупроводниках плоские  $p-n$ -переходы с заданным распределением легирующих примесей по толщине. Поэтому нет принципиальных препятствий и для получения высокого КПД инжекционных источников видимого света.

Второй вопрос, который придется решать разработчикам такого ИС, — как выпустить наружу возникающий в нем свет. Центры свечения испускают его почти равномерно во все стороны, а из-за большого показателя преломления выходят наружу только те лучи, которые падают на поверхность пленки почти по нормали. Так, при показателе преломления 2,4 выходят наружу лишь 10 % падающего на поверхность света. Поэтому необходимо, чтобы свет многократно подходил к поверхности пленки, каждый раз под другим углом. Чтобы достигнуть этого, плоскостной непрозрачный электрод надо сделать непоглощающим, т. е. отражающим, а еще лучше — рассеивающим падающий на него свет. В первом случае рассеивать свет должна прозрачная поверхность пленки или ее объем, а во втором — пленка может быть оптически прозрачной.

Итак, имеется три нетрадиционных пути, сулящих значительное повышение световой отдачи ИС. Рассмотрим их с точки зрения требований физиологической оптики. Новые ЛЛ будут в этом отношении мало отличаться от теперешних: хорошая цветопередача, но заметная пульсация света с частотой 100 Гц. Новая ЛН пульсировать практически не будет из-за большой тепловой инерции тела накала, но вероятно будет давать свет с меньшей цветовой температурой, чем ЛЛ. Инжекционные ИС будут вероятно сравнимо узкополосными. Но благодаря малым размерам их можно соединить в гирлянду по 5—6 шт., чтобы перекрыть всю видимую область и получить желаемую цветовую температуру. Пульсация света будет иметь частоту 50 Гц, но можно включить встречно-параллельно две гирлянды и получить частоту 100 Гц. Если добавить еще и слаживающие конденсаторы, то мигание можно свести к минимуму. Так как инжекционный ИС наиболее эффективен, когда на  $p-n$ -переходе падает всего несколько вольт, то к гирлянде придется делать еще понижающий трансформатор. Для бытовых ламп, соответствующих современным ЛН мощностью 40—60 Вт, потребуется трансформатор мощностью всего в несколько ватт. Такой источник будет вероятно самый дорогой, но зато самый эффективный и долговечный.

Несомненно, что каждый из трех рассмотренных путей требует большой работы. Начинать придется с исследований, имеющих фундаментальный характер и направленных на выяснение деталей механизма свечения. Эти исследования надо вести вместе с технологическими, цель которых — получение необходимых люминофоров, и лишь на последнем этапе можно будет заняться созданием самих ИС. На это потребуются большие средства, но и результат стоит того.

Не стоит гадать, который из путей первым приведет к цели, но рано или поздно все три новых ИС займут свое место в светотехнике.

\* \* \*

The paper discusses some of the possibilities associated with converting the electric power to a «white» light.

УДК 621.326

## О ЛАМПАХ НАКАЛИВАНИЯ С УГЛЕРОДНЫМ КОМПОЗИЦИОННЫМ ТЕЛОМ НАКАЛА

Н. С. ВДОВИН, канд. техн. наук,  
А. В. МОРДЮК, инж., М. И. РОГАЙЛИН,  
канд. техн. наук

Всесоюзный институт источников света  
им. А. Н. Лодыгина

В связи с возможным дефицитом вольфрамовой проволоки для тела накала (ТН) в лампах накаливания нами проведены исследования по замене ее композиционным материалом на основе углеродного волокна. Применение углеродных волокон обусловлено благоприятным сочетанием их свойств и техническим прогрессом в области разработки их новых разновидностей. В работе приведены основные технологические процессы получения такого ТН; представлены результаты исследования физических свойств материала, обуславливающих поведение его в лампе, а также измерения световых и электрических параметров ламп.

Получение композиционного ТН, предложенное авторами, наполнителем в котором является полифиламентное углеродное волокно, а матрицей — кристаллический пироуглерод, состоит из следующих основных технологических операций [1]:

формования заготовки из исходного полифиламентного углеродного волокна методом сухой намотки на графитовую оправку заданного размера;

термохимической обработки исходной заготовки для формирования композиционного углерод-углеродного материала путем осаждения пироуглерода из газовой фазы на поверхность и в объем заготовки при термическом разложении углеродсодержащего газа;

высокотемпературной термообработки полученных ТН при температуре их эксплуатации для снятия внутренних механических напряжений.

С увеличением содержания пироуглерода, осажденного в поры углеродной полифиламентной нити, происходит значительное упрочнение материала, вся композиция приобретает жесткость, увеличивается диаметр, растет плотность углеродной нити и существенно снижается величина электросопротивления (см. таблицу).

Технологические процессы сборки, монтажа, откачки, наполнения и заварки ламп с углеродным ТН аналогичны технологии изготовления ЛН общего назначения и отличаются лишь режимами отдельных технологических операций

Изменение свойств углеродных нитей в процессе формирования композиционного материала ТН

Длительность термообработки, ч, для нити марки «Урал»	Привес пироуглерода, %	Диаметр нити, мм	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Прочность, кг/мм <sup>2</sup>	Электросопротивление, Ом·мм <sup>2</sup> /м
0	—	0,6	0,68	87,94	252,63
8	36,5	0,61	0,74	97,43	221,40
60	127,0	0,63	1,31	118,76	64,98
90	149,3	0,64	1,46	157,50	48,34

Согласно существующей в настоящее время в материаловедении кинетической концепции разрушения, деформация и разрушение характеризуются не критическими значениями, а скоростью деформации и разрушения, а также временем до разрушения.

На рис. 1,а представлены экспериментальные зависимости времени до разрушения  $\tau_p$  образцов ТН от температуры при различных нагрузках, а на рис. 1,б эти же результаты в полулогарифмических координатах  $\ln \tau_p = f(1/T)$ . Энергия активации разрушения  $U = U_0 - \gamma\sigma$  уменьшается с увеличением  $\sigma$ . Для самой малой нагрузки энергия активации разрушения равна 167 ккал/(г·ат), что близко к энергии сублимации углерода [ $\sim 170$  ккал/(г·ат)]. Разрушение образца наступает при нагрузках гораздо меньших предела прочности материала. С ростом температуры испытаний образцы композиционного материала разрушались быстрее, что объясняется увеличением количества разру-