

СОВРЕМЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ СВЕТА *

Е. Лакс, М. Пирани и Р. Ромпе, Берлин

За последние двадцать лет светотехника действительно обратилась в одну из отраслей техники как в отношении способов добычания света (источники света), так и в смысле его распределения. Третья группа вопросов, заключающая в себе физиологический и психологический анализ зрения, во всяком случае в применении к светотехнике, была понята во всем ее значении лишь в течение прошедшего десятилетия и лишь теперь начинает приниматься во внимание. Указанное превращение можно пояснить двумя примерами из области задач о распределении света.

В начале XX века устройство осветительных установок определялось лишь заданием определенной освещенности, которая задавалась как освещенность в горизонтальном направлении на высоте 1 м от пола помещения. Существовали простые правила, по которым определялось количество и расположение дуговых ламп, или ламп накаливания (другие источники света в те времена почти не применялись). В настоящее время при расчете освещения исходят из того, какая работа ведется в освещаемом помещении. Исследованию подвергаются задачи, стоящие перед зрением в отношении необходимой разрешающей способности глаза, принимая при этом во внимание те материалы, с которыми приходится иметь дело. И при одних и тех же требованиях к зрению в зависимости от подвергающегося обработке материала приходят к различным решениям. Так например, в текстильной промышленности для получения наилучших условий зрения ткацкие станки для хлопчатой бумаги оказывается необходимым освещать иначе, чем те же станки при тканье искусственного шелка¹.

Такой подход к проблемам техники освещения, как уже говорилось, требует глубокого исследования физиологических и психологических основ зрения. Наши знания в этой области в настоящее время еще весьма далеки от полноты, и потребуются большое количество работы, прежде чем можно будет думать о полном решении задач, возникающих при разработке вопросов освещения.

Круг психо-физиологических проблем, с которыми приходится встречаться, можно кратко очертить следующим образом: нужно исследовать, какое излучение может быть воспринято опре-

* Naturwiss., 23, 393, 1935. Перевод Н. Хлебникова.

деленным приемником — глазом — и каким образом свойства этого излучения — в отношении интенсивности и спектрального состава — влияют на работоспособность глаза.

Подобно чувствительности фотоэлемента, чувствительность глаза зависит от длины волны падающего на него света. Показание измерительного прибора включенного в цепь фотоэлемента, имеющего максимум чувствительности, например, в зеленой части спектра, окажется при освещении зеленым светом больше, чем при освещении равным количеством энергии из красной или голубой области спектра. Точно так же человеческий глаз производит под действием зеленого света физиологическое раздражение, более сильное чем под действием красного или синего излучения той же интенсивности. Эту способность производить раздражение под действием света, дающую меру для интенсивности излучения с учетом спектрального распределения чувствительности, называют яркостной чувствительностью глаза.

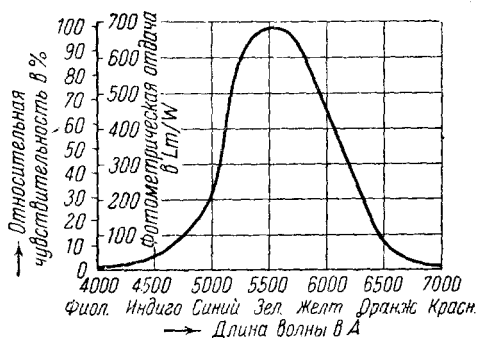


Рис. 1. Кривая видимости человеческого глаза

вые отклонения на измерительном приборе (при условии, что произведение из спектральной чувствительности фотоэлемента на интенсивность излучения остается неизменной), в случае глаза мы имеем нечто совершенно иное. Глаз может различать излучение не только по яркости, но и по спектральному составу, благодаря чему внутри интервала чувствительности глаза оказывается возможным различение света по длинам волн. Мы имели уже в виду это обстоятельство, говоря выше о зеленом и красном свете.

И яркостная и цветовая чувствительность глаза являются сложными зависимостями, исследование которых представляет большие трудности вследствие значительного числа определяющих их параметров. Обе величины зависят от посторонних обстоятельств, например, от того, на каком фоне — белом, черном, или цветном — появляется данный цвет („относительные цвета“ В. Оствальда²⁾).

Когда спектрально сложное излучение падает на фотоэлемент, результирующий эффект получается как сумма эффектов составляющих (конечно, с учетом спектрального распределения чувствительности). Подобным же образом яркостное впечатление глаза для смешанного излучения определяется суммой отдельных яркостей. При этом, однако, возникает еще и определенное цветовое ощущение, соответствующее восприятию данного сложного цвета.

До этого момента аналогия между фотоэлементом и глазом является полной. Но в то время как, освещая фотоэлемент излучением с различными длинами волн, мы будем получать одинако-

Количественное восприятие глаза определяется кривой видимости, изображенной на рис. 1. Для получения цветового восприятия надлежит согласно теории Юнга-Гельмгольца, суммировать возбуждения, вызываемые тремя основными раздражителями. Кривые возбуждения для них приведены на рис. 2; наглядную картину дает цветовой треугольник, показанный на рис. 3. Здесь каждому цветовому впечатлению соответствует одна точка. Смешанные цвета даются точками, лежащими на линиях, соединяющих исходные цвета.

Между координатами кривой видимости и координатами цветового треугольника могут быть установлены количественные соотношения, позволяющие вычислять значения яркостного восприятия по цветовому возбуждению. Эти соотношения были впервые установлены Кенигом и Дитеричи³. Из большого числа дальнейших работ в этом направлении мы упомянем здесь недавно напечатанное исследование Гильда и Райта⁴.

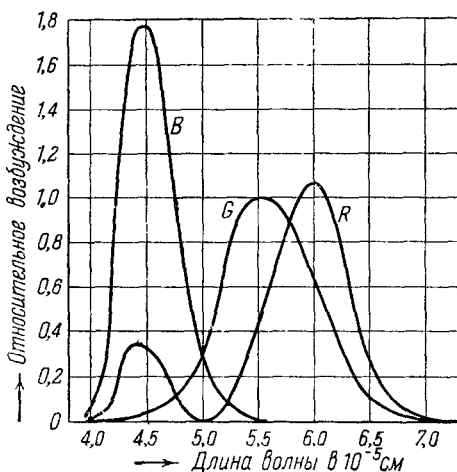


Рис. 2. Кривые возбуждения для трех основных раздражителей

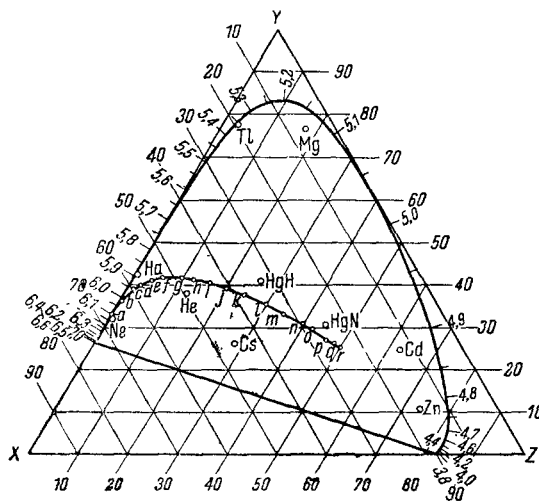


Рис. 3. Максвелл-гельмгольцевский цветовой треугольник.

Длины волн даны в 10^{-5} см. Кривая дает цвет излучения черного тела ($a = 100^\circ$, $b = 1200^\circ$, $c = 1400^\circ$, $d = 1600^\circ$, $e = 1880^\circ$, $f = 2000^\circ$, $g = 2400^\circ$, $h = 2600^\circ$, $i = 3000^\circ$, $j = 3500^\circ$, $k = 4000^\circ$, $l = 5000^\circ$, $m = 6000^\circ$, $n = 8000^\circ$, $o = 10000^\circ$, $p = 14000^\circ$, $q = 20000^\circ$, $r = 28000^\circ$). Цвет излучения вольфрамовой лампы дается точками этой кривой, лежащими между g и i . На

треугольнике отмечены цвета излучения ламп газового разряда: Ne-неоновой лампы, Na-натровой, Cs-цезиевой, He-гелиевой, HgH-ртутной, высокого давления, HgN-ртутной, низкого давления, Ti-таллиевой, Mg-магниевой, Cd-кадмиевой, Zn-цинковой

Из цветового треугольника мы видим, что одно и то же цветовое впечатление может быть вызвано совершенно различными способами смешения цветов. Два кажущихся одинаково окрашенными, но различных по способу получения световых потоков могут, однако, обнаруживать сильные различия для определенных условий работы глаза. Так например, по причине известного недостатка ахроматизма оптической системы глаза, в тех случаях, когда нужно иметь возможно большую остроту зрения⁶, надлежит выбирать желтый монохроматический свет. В случае желтого света, полученного смешением красного и зеленого, имеющего почти тот же тон, никакого улучшения в смысле резкости видения не произойдет.

Помимо рассматривавшихся до сих пор физиологических явлений, связанных с зрением, нам известны еще психологические эффекты, вызываемые физиологическим восприятием и в свою очередь воздействующими на них. Принятые в обиходе характеристики света „теплый“ и „холодный“ указывают на то, что психо-физиологическое взаимодействие играет роль в восприятии света. Тем не менее в рассматриваемой области до сих пор нет еще надежного с научной точки зрения материала. Причиной этого являются трудности, с которыми связаны систематические исследования таких пограничных областей. Психологическая картина явления не поддается объективному исследованию и меняется от субъекта к субъекту. Поэтому в отдельных случаях, например при сильно окрашенном свете, нельзя установить, является ли освещение „хорошим“ во всех отношениях. Вследствие этого до сих пор оказывается невозможным также и исключить этот весьма индивидуальный психологический фактор и выбрать источник света таким образом, чтобы все без исключения испытуемые лица не испытывали неприятных ощущений.

Современное состояние техники изготовления источников света в большинстве случаев допускает для каждой отдельной цели несколько почти одинаково удачных решений. Поэтому выбор источника света в каждом конкретном случае производился на основании технико-экономических соображений, тем более что этот момент является одной из существенных частей общей задачи распределения света. Рассмотрим для примера задачу о создании освещения, близкого по спектральному составу излучения к дневному, которое бывает необходимо, например, при сортировке изделий по цвету. В этом случае необходимо стремиться к тому, чтобы цвета предметов были при свете источника теми же, что и при дневном свете, т. е. чтобы распределение энергии в спектре источника было возможно ближе к распределению в дневном свете. Таким источником является, например, лампа с углекислым газом, и потому она будет признана пригодной, несмотря на то, что отдача ее мала. Если же речь идет об устранении двойного света, т. е. о выравнивании разности цветности излучения источников, добавляющих свет к дневному, такое выравнивание можно произвести с физической точки зрения совсем неточно. С другой стороны, здесь существенно, чтобы это улучшение не слишком сильно

сказывалось на стоимости освещения, например, по сравнению с освещением лампами накаливания.

Здесь нужно отметить, что подойти к решению указанных выше проблем впервые оказалось возможным лишь после того, как был разработан ряд ламп газового разряда, особенно ламп, дающих монохроматическое излучение. При помощи этих источников света впервые были осуществлены условия видения, существенно отличающиеся от условий нормального видения при „белом“ свете. Насколько могут быть выполнены все требования, предъявляемые к источникам света на основании физиологических и психологических данных, можно установить, лишь точно зная все возможности добывания света. Можно сказать даже, что всякое практическое рассмотрение светотехнических проблем предполагает развитие техники изготовления источников света, допускающее получение света желаемой интенсивности и спектрального состава. В этом состоит важнейшее требование, предъявляемое светотехникой к физике.

Установить эмиссионные свойства существующих или возможных источников света можно лишь на основании рассмотрения физической стороны процесса излучения. После того как это сделано, на долю техники падает весьма нелегкая задача практического развития найденных возможностей.

Техника изготовления источников света впервые получила серьезную научную основу в известных работах Луммера и Прингсгейма⁶ по излучению абсолютно черного тела. Вычисление распределения энергии в спектре испускания твердого тела и затем исследование излучения твердых тел привели к установлению границ экономичности источников света с накаливаемыми твердыми телами. Установление того факта, что экономичность температурного излучателя повышается с повышением температуры, повело к разысканию веществ с высокими температурами плавления. Был получен ряд тугоплавких соединений (табл. 1) и исследована их применимость в качестве материалов для тела накала. Одновременно исследовалась возможность ослабления испарения металлов (в особенности вольфрама) и их

ТАБЛИЦА 1
Точки плавления тугоплавких соединений

	Соединение	Температура плавления в °К	
1	Карбид титана	3410	} Предел ошибки ~ 50°
2	Нитрид	3220	
3	„ циркония	3255	
4	„ тантала	3360	
5	Борид циркония	3265	
6	„ гафния	3335	
7	Карбид тантала	4150	
8	„ гафния	4160	
9	„ циркония	3805	

ТАБЛИЦА 2

Различные возможности добывания света и их техническое использование

Род атома	Плотность: число молекул в 1 см^2	Плотность тока А/см^2	Характерные черты явлений	Примеры технического использования
1. Na Hg Tl	10^{12} 10^{13} 10^{13}	От 0,1 до 0,3	А ВОЗБУЖДЕНИЕ УДАРАМИ ЭЛЕКТРОНОВ 1. Одноатомные газы и пары При малых плотностях и плотностях тока. Концентрация возбужденных и ионизованных атомов мала соответственно малому числу столкновений с электронами. Испускание резонансных линий	Натровая лампа для освещения улиц, таллиевая спектральная лампа, ртутная лампа с фосфорами
2. He, Ne Ar, Kr Xe, Hg Mg, Cs Rb	От 10^{14} до 10^{17}	От 0,2 до 0,8	Концентрация возбужденных атомов достигает столь высоких значений, что становится заметным взаимодействие между ними и электронами. Испускание высших линий вследствие ступенчатого возбуждения заполненных уровней	Ртутная и натровая рекламные лампы; гелиевая, неоновая, кадмиевая и цинковая спектральные лампы; ртутная и неоновая точечные лампы
3. Hg, He Ca, Cs Ce, Rb	От 10^{17} до 10^{19}	От 0,5 до 1	С увеличением плотности и плотности тока центр тяжести испускания перемещается в сторону более высоких уровней	Ртутные лампы высокого давления; ртутные спектральные лампы
4. Rb, Cs K, He	От 10^{15} до 10^{19}	Около 1	Появление запрещенных линий, расширение высших членов серий, ре-	Рубидиевые и цезиевые спектральные лампы

Mg, Zn Ca .			комбинационное свечение, появление поляризованных молекул	
5. Hg	От 10^{20} до 10^{22}	До 20000	Расширение линий, аномальное распределение интенсивности, появление искровых линий, появление интенсивных участков сплошного спектра	а) Большие плотности — специальные ртутные лампы большой яркости б) Большие плотности тока — кинопроекторные лампы
N ₂ , CO Te ₂ , J ₂	От 10^{12} до 10^{19}	От 10^{-2} до 10	II. Двухатомные газы и пары При низких концентрациях возбужденных молекул — „резонансные полосы“, при более высоких концентрациях — более высокие полосы и т. д., подобно случаю одноатомных газов	Лампы с азотом, лампы с теллуром, точечные лампы с азотом
CO ₂ , TiCl ₄ , ZnCl ₄ , C ₂ H ₂ и др.	От 10^{12} до 10^{19}	От 10^{-2} до 1	III. Многоатомные молекулы В случае диссоциации возбуждаются образующиеся простые (двухатомные) молекулы. В остальном, как в пункте II.	Лампы дневного света
Металлы	10	—	IV. Возбуждение свечения твердого тела ударами быстрых электронов 1. Возбуждение излучения при торможении электронов	Рентгеновские трубки; для получения видимого света до сих пор не применяется
Ленардовские фосфоры .	10^{17} (светящиеся системы)	—	2. Возбуждение особых изолированных „светящихся систем“ в кристаллических твердых телах. [Помимо электронов, могут применяться и тяжелые частицы — (α -частицы, протоны и т. д.)]	Фосфоресцирующие экраны, радиоактивные светящиеся краски
фосфоры типа рубина .	10^{28} (основное вещество)	—		

Род атома	Плотность: число молекул в 1 см^3	Плотность тока А/см^2	Характерные черты явлений	Примеры технического использования
В. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В СОСТОЯНИИ РАВНОВЕСИЯ (ТЕМПЕРАТУРНОЕ РАВНОВЕСИЕ)				
Металлы	10^{23}	От 600 и выше	Все вещества испускают электромагнитное излучение, состав которого определяется температурой тела и его излучательными свойствами (теоретически это может быть исследовано для идеального случая абсолютно черного тела). По способу подведения энергии можно различать:	1. а) Вольфрамовые и угольные лампы накаливания, дуговые лампы, б) Лампы Нерста
Оксиды	10^{23}			
Вольтова дуга в азоте .	10^{19}			
Ртуть	От 10^{19} до 10^{23}			
Подводная искра и дуга (H_2O)	10^{23}			
Иод от 800°		2. Подведенные энергии через соударение частиц, например при нагревании (см. также хемилюминисценцию)	3. Подведение энергии (в основном) посредством ударов электронов — в газах при плотностях свыше 10^{19}	2. Газокалильные лампы
Сера от 1000°				
Натрий от 1000°				
Селен от 1000°				
Теллур от 1000° и др. .				3. Дуговые лампы, ртутные лампы высокого давления

т. поведение энергии через соударения частиц — в газах при „термическом возбуждении“

4. Натровое пламя

С. ХЕМИЛЮМИНИСЦЕНЦИЯ

Реакция Na с Cl в газообразном состоянии .

10^{10}

При некоторых химических реакциях освобождающаяся энергия передается способным излучать системам

Пламя бунзеновской горелки
Ауэровская горелка

Акрилиновая люминисценция в жидком состоянии

1. В случае реакций в газообразном состоянии испускаются линии или отдельные полосы

Светящиеся мухи

Свечение при кристаллизации в твердом состоянии

2. В случае реакций в жидком состоянии испускаются непрерывные полосатые спектры

D. ВОЗБУЖДЕНИЕ СВЕЧЕНИЯ ПОСРЕДСТВОМ ИЗЛУЧЕНИЯ

Na, Ti
Hg и т. д.

10^3
 $10^{10}—10^{12}$

Возбуждение отдельными линиями

Одноатомные газы при малых плотностях — испускание резонансной линии во всем объеме (слабое поглощение); при больших плотностях — испускание резонансной линии в месте вхождения возбуждающего пучка (сильное поглощение)

Род атома	Плотность: число молекул в 1 см^3	Плотность тока А/см^2	Характерные черты явлений	Примеры технического использования
S_2Te_2 S_2J_2	10^3 $10^{10}-10^{12}$		Двухатомные газы при малых плотностях — испускание резонансных серий; при больших плотностях — испускание резонансных систем полос <i>Возбуждение целым участком спектра или какой-либо линией из него</i> Газы — испускание всего спектра поглощения	
Все газы	—			
Флуоресцеин, возин . .	10^{17} (красящего вещества)			
Родамин и др.	10^{22} (растворителя)		Жидкости — испускание света в редких случаях (флуоресцирующие жидкости) испускание сильно размытых полос	Родаминовые краски
Бензол при низких температурах, ураниловые соли	10^{23}		Твердые тела, кристаллоиды: светящиеся системы изолированы, поведение подобно таковому газовых молекул при достаточно низких температурах	
Ленардовские фосфоры, рубин, кальцит, ураниловые соли, светящиеся краски, люминесцентные краски	10^{17} (центров) 10^{23} (основное вещество)		Фосфоры: Возбуждение через посредство имеющихся в веществе посторонних атомов; передача энергии связана с изменением частоты	Ртутные лампы с фосфорами, фосфоресцирующие краски

кристаллизация при высоких температурах. Все это привело к созданию современных ламп накаливания.

Накопившиеся тем временем сведения об излучении атомов и молекул веществ, находящихся в газообразном состоянии, вновь дали возможность использовать физику в светотехнике, что в свою очередь дало толчок к дальнейшему исследованию процессов излучения.

Мы попытались систематизировать различные возможности получения света в форме таблицы (табл. 2); из этой таблицы можно видеть также, что вступило уже к настоящему времени в область технического использования. Дальнейший текст предназначен служить только пояснением к табл. 2 и потому сам по себе является не более чем схематическим обзором рассматриваемых вопросов

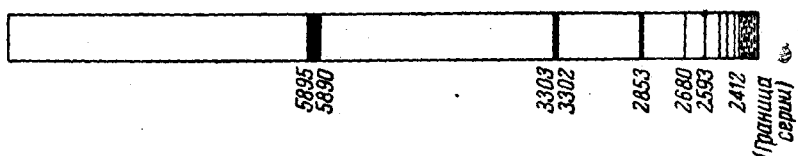


Рис. 4. Резонансная серия натрия

Основой всякого способа добывания света, как и всякого способа создания электромагнитного излучения, является наличие переменной напряженности электрического поля. Таковая возникает:

- 1) при периодических движениях электрических зарядов,
- 2) при аperiodических, особенно „внезапных“ изменениях скорости движущихся заряженных частиц („излучение торможения“).

Системы, в которых имеет место периодическое движение, обладают характерными собственными частотами — „линиями“. В какой мере эти собственные частоты дают излучение, зависит прежде всего от связи системы с окружающей средой и затем от характера возбуждения. В дальнейшем нас будут интересовать собственные колебания атомов и молекул.

Идеальные условия возникновения собственных колебаний осуществляются при существовании одного единственного атома в чрезвычайно разреженном газе. Основное колебание, дающее излучение „резонансной линии“, может быть возбуждено в совершенно чистом виде путем воздействия на атом излучением этой же самой частоты, или ударами электронов, обладающих определенной скоростью⁷.

При наличии электронов с несколько большими скоростями возбуждается вся „резонансная серия“, которая в случае атомов, имеющих простое строение, представляет собой ясную последовательность линий. Почти изолированные атомы существуют в разреженных газах при давлениях до 10^{-3} мм Hg. Эти почти идеальные условия могут быть созданы в условиях эксперимента, и при излучении с частотами, соответствующими резонансной серии или бомбардировке электронами надлежащих скоростей, возникает испускание соответствующих линий резонансной серии. На с. 4 можно видеть резонансную серию натрия.

Спектр двухатомного газа можно представлять себе возникающим из спектра одноатомного таким образом, что каждая линия рас-

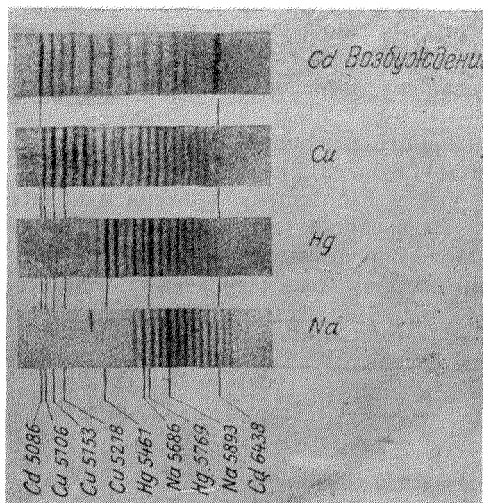


Рис. 5. Резонансный спектр J_2 , возбужденный различными линиями

щепляется в систему полос вследствие наложения внутренних колебаний и вращений молекулы. Возбуждая резонансное излучение воздействием монохроматического света или толчками электронов, в этом случае, получают вместо испускания линии испускание ряда линий. Типичная картина такого расщепления изображена на рис. 5 (резонансная серия молекулы иода).

В случае многоатомных газов благодаря существованию большого числа возможных колебаний спектр оказывается еще более сложным,

обращаясь в некоторых местах из полосатого в сплошной.

Если пользоваться не очень сильно разреженными одноатомными газами, колебания вследствие взаимодействия отдельных атомов

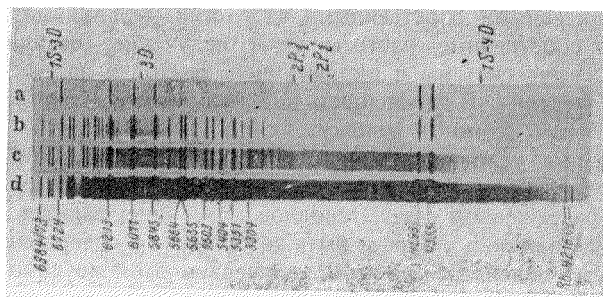


Рис. 6. Спектр положительного столба разряда в смеси паров цезия с благородным газом при различных давлениях паров цезия: а) 0,002 мм Hg, б) 0,02 мм Hg, в) 0,1 мм Hg, г) 100 мм Hg

оказываются „нерезкими“. Это выражается на спектрограм в расширении линий, которое с повышением давления может с очень значительным. На рис. 6 изображено это изменение спектров паров цезия под действием изменения давления⁸. В случае молекулярных газов взаимодействие отдельных молекул проявля

также и в том, что вместо рядов резонансных линий с повышением давления возникает испускание более или менее полных полос.

Дальнейшее „заполнение спектра“ вызывается тем, что при сильном возбуждении концентрация возбужденных и ионизованных атомов может увеличиться настолько, что их взаимодействие с световыми квантами и электронами станет играть значительную роль в излучении. При этом в спектре появляются „более высокие“ линии, т. е. такие, которые являются линиями поглощения не нормальных атомов, но возбужденных атомов и ионов.

Одновременно обнаруживается сильное расширение линий⁹ и появление областей сплошного спектра (ср. рис. 6). Эти области

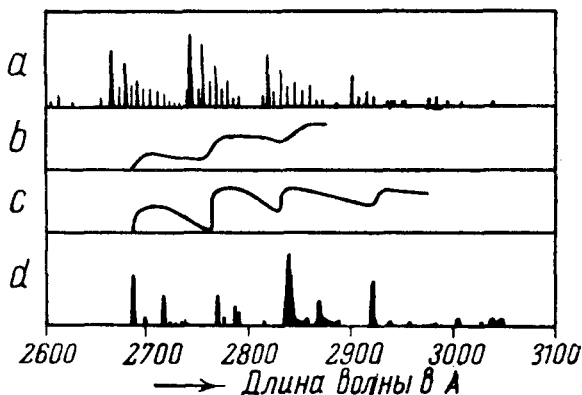


Рис. 7. Спектр флуоресценции бензола при возбуждении ультрафиолетовыми линиями ртути: а) газообразный бензол, б) жидкий, в) твердый при 0° С, д) твердый при -180° С.

часто наблюдаются в тех случаях, когда вследствие высокой концентрации ионов часто имеет место рекомбинация ионов с электронами.

В случае жидкостей связь молекул между собой, вообще говоря, настолько сильна, что изолированные частоты (линии) не возбуждаются. Лишь в тех случаях, когда излучающая частица изолирована окружающей средой, она может флуоресцировать, поглощая и затем испуская излучение в определенной области частот, в большинстве случаев — в виде полосы непрерывного спектра. Испускание и поглощение подчиняется при этом закону Стокса, согласно которому частота испущенного излучения меньше частоты поглощенного или, в крайнем случае, равна ей¹⁰. К числу флуоресцирующих жидкостей относятся, например, растворы флуоресцеина, эозина и родамина.

Среди неметаллических твердых веществ имеется большое число таких, отдельные атомы которых находятся в том же положении, что и „светящиеся“ атомы флуоресцирующих жидкостей, подобно которым эти твердые тела и ведут себя, особенно при низких температурах. В качестве примера мы приводим на рис. 7 спектр

бензола, полученный при возбуждении свечения с помощью лучистой энергии. Относительно другой группы флуоресцирующих веществ, так называемых фосфоров, будет несколько подробнее сказано ниже.

Возбуждение собственных колебаний электронной бомбардировкой, в случае жидкостей не наблюдается; в случае неметаллических твердых тел наблюдается только для фосфоров. При падении электронов на металл возникает излучение, являющееся следствием торможения электронов вблизи поверхности. Это излучение торможения при скоростях электронов в 7 V лежит для W, Al, Be, Th, Pt, Cu, Ag, в видимой и близкой ультрафиолетовой областях спектра¹¹. В рентгеновских трубках торможение очень быстрых электронов (до 10^6 V) используется для получения рентгеновых лучей. Излучение уже упоминавшихся светящихся центров фосфоров, помимо световых квантов, может быть возбуждено быстрыми электронами и ударами тяжелых частиц (α -лучи).

До сих пор в качестве причин возбуждения атомов и молекул мы рассматривали излучение определенных частот и электроны с определенными скоростями. Дальнейшая возможность сообщения излучающей системе дискретных количеств энергии дается передачей энергии при столкновениях атомов и молекул между собой, что и имеет место при химических реакциях в газообразном и жидком состояниях (хемилюминисценция). Как и при других способах возбуждения, в этом случае также газы дают отдельные линии и полосы, а жидкости — отдельные участки сплошного спектра. Возбуждение этого рода возможно также на поверхности некоторых твердых тел. Например, этим можно объяснить особенное излучение некоторых оксидов, помещенных в водородное пламя: это излучение должно быть приписано имеющим место в водородном пламени процессам восстановления¹².

В рассмотренных до сих пор случаях возбуждения свечения почти всюду речь шла об излучающих системах, механизм излучения которых является настолько независимым от внутренних и внешних движений, что затрата энергии на эти процессы никак не отзывается на процессе испускания.

В то время как для изолированных и свободно колеблющихся атомов статистическое рассмотрение температуры, предполагающее определенную возможность выравнивания внутренних энергий отдельных систем, неприменимо, в случае плотно упакованных атомов (например твердое тело), оно может быть с полным основанием использовано. В состоянии температурного равновесия испускаемая энергия распределяется по всем возможным частотам колебаний системы согласно законам, определяемым полным запасом энергии тела и его свойствами как излучателя. В случае газов (под большим давлением) получают спектры, состоящие из слабого фона непрерывного спектра, на который накладывается линейный спектр. На рис. 6 в качестве примера приведен спектр цезия при давлении в 100 мм Hg. Рис. 8 показывает спектр ртутной лампы, построенной К. Болем¹³, давление паров ртути в которой достигает 150 атм;

этот спектр, как мы видим, имеет тот же характер. Того же самого типа спектры дают пары в вольтовых дугах дуговых ламп, широко использовавшихся в свое время для освещения улиц.

Спектры твердых и жидких тел являются непрерывными. Иногда, например в случае угля, энергия распределяется в широкой области спектра, напоминая распределение энергии в спектре черного тела; в других случаях (например излучение эрбия¹⁴) спектр твердого тела имеет ярко выраженную полосатую структуру.

Выбор, который делает светотехника из многообразия представляющихся возможностей, определяется, с одной стороны, физическими константами материалов, с другой же состоянием знаний и техническими возможностями. Среди констант, определяющих возможность применения того или иного процесса для добывания света, могут быть указаны, например, следующие: давление паров, температура плавления, химическая активность. Существенную роль

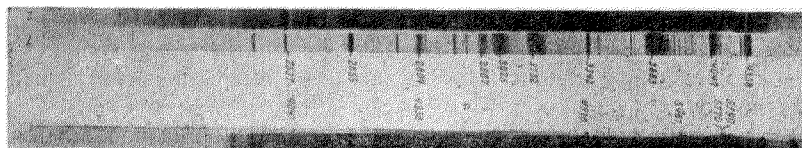


Рис. 8. Спектр ртутной лампы (по К. Болю): а) видимый спектр, б) ультрафиолетовый (1 — короткая экспозиция, 2 — более длительная экспозиция)

играет, конечно, и расположение испускаемых частот по отношению к кривой видимости глаза.

Помимо постоянных, характеризующих вещество, весьма важной является возможность целесообразного поведения энергии к техническому образцу источника света. В случае металлических твердых тел наилучшим способом является нагревание металла проходящим током (лампы накаливания) или дуговым разрядом (вольтова дуга). В случае непроводящих материалов с успехом применяется накаливание в пламени (спирто-керосино-и газокалильные лампы).

Для газообразных веществ применяется возбуждение свечения атомов посредством газового разряда. Этот способ обладает с точки зрения современной техники тем важным достоинством, что в нем осуществляется непосредственное преобразование электрической энергии в свет. Для того чтобы иметь возможность, как можно полнее светотехнически использовать излучение газов и паров, было необходимо систематическое исследование соответствующих процессов, в частности испускательной способности, в зависимости от давления газа и плотности тока. Исследования этого рода проведены до настоящего времени лишь в очень малой части. Причиной этого является то, что эти исследования вследствие больших экспериментальных трудностей требуют затраты большого количества времени и труда. К тому же во многих случаях, прежде чем вести физическое исследование, необходимо развивать технику изготовления нужных материалов.

Примером этому может служить натровая лампа. Тот факт, что резонансная линия натрия лежит близко к максимуму кривой чувствительности глаза, был давно известен. Вопрос о возможности экономичного получения этого резонансного излучения не был исследован, и выяснение его стало возможным лишь после того, как был изготовлен сорт стекла, не подверженный воздействию паров натрия. После этого был исследован разряд в парах натрия и измерен коэффициент полезного действия превращения энергии электронов в энергию излучения. При значительных давлениях паров и малых плотностях тока этот коэффициент оказался равным 80%. Столь высокий коэффициент, который в дальнейших опытах удалось поднять почти до 100%, осуществим, однако, лишь в лабораторных условиях. Другая физическая постоянная — давление паров натрия — определяет температуру стенки баллона лампы, которая, как оказывается, должна равняться 280°. Это обуславливает потери на тепловое излучение, конвекцию и теплопроводность. Технический источник света может поэтому работать лишь при условиях, в которых подводимая энергия тратится не только на возбуждение излучающих атомов, но и на покрытие всех указанных потерь.

В излучении положительного столба технической натровой лампы преобладает резонансная линия, как это можно видеть из табл. 3. Каков общий баланс энергии в технической натровой лампе, мы укажем несколько ниже.

ТАБЛИЦА 3

Относительная интенсивность и относительная яркость линий в положительном столбе натровой лампы *

Длина волны в Å	Относительная интенсивность J_{λ}^{**}	Относительная яркость $J_{\lambda} V_{\lambda}$ (V_{λ} — чувствительность глаза)
11404—382	10	0,0
8195— 83	19	0,0
6161— 54	0,3	0,13
5896— 90	100	76,5
5688— 83	1,2	1,15
5154— 49	0,1	0,06
4983— 79	0,2	0,05

$$\sum J_{\lambda} = 130,8; \quad \sum J_{\lambda} \cdot V_{\lambda} = 77,90; \quad \frac{\sum J_{\lambda} \cdot V_{\lambda}}{\sum J_{\lambda}} = 0,595.$$

$$\text{Светоотдача}^{***} \text{ равна } \frac{0,595}{0,00145} = 410 \text{ Lm/W.}$$

Давление паров натрия около $5 \cdot 10^{-3}$ мм Hg, плотность тока — 1 А/см², основной газ — неон при давлении в несколько мм Hg.

** Интенсивность линий 5890—96 Å произвольно положена равной 100%.

*** Имеется в виду излучение, проходящее сквозь стеклянные стенки трубки,

Во всех других применявшихся до сих пор лампах газового разряда (Hg, He, Ne, Zn, Cd и т. д.) в добывании света существенную роль играют лишь высшие члены серий. Поскольку происходит испускание большого числа линий, многие из них лежат вне видимой области. Те из них, которые расположены в ультрафиолете, могут быть использованы для получения света путем облучения ими соответствующих фосфоров.

Принимая во внимание то значение, которое фосфоры по своим свойствам „трансформаторов света“ могут играть в светотехнике, мы считаем оправданным небольшое отступление в эту область.

При фосфоресценции твердых и жидких веществ речь идет о процессе, который, несмотря на известное внешнее сходство с флуоресценцией, существенно от нее отличается. В то время как при флуоресценции центр поглощения является в то же время и центром реэмиссии, в случае фосфоресценции центры поглощения и испускания различны.

Связь между процессами испускания и поглощения, несмотря на некоторые успехи в этом направлении, еще ни в коей мере не может считаться выясненной. Относительно практически наиболее важной группы фосфоров — ленардовских фосфоров¹⁷ — известно, что они способны сохранять энергию возбуждения в течение некоторого промежутка времени. Эта способность связана с наличием так называемых активаторов (например атомы Ag, Си и т. д.), присутствующих в ничтожных концентрациях ($\sim 10^{-6}$) в основном веществе. Посредством неизвестных нам еще процессов, в которых играет роль тепловое движение (что следует из температурной зависимости „высвечивания“ фосфоров), энергия возбуждения передается излучающим системам.

Спектр ленардовских фосфоров отличается от спектров флуоресцирующих газов и жидкостей. В этих последних вследствие идентичности поглощающих и испускающих систем поглощаемые и испускаемые длины волн связаны определенными соотношениями. Полосы поглощения и испускания примыкают и накладываются друг на друга. В случае ленардовских фосфоров не существует такой непосредственной связи между поглощенными и испускаемыми длинами волн. Однако из энергетических соображений вытекает общее правило, что поглощаются более короткие волны, чем те, которые затем испускаются. Положение линий в спектре сильно зависит от состава и строения фосфора.

Рис. 9 показывает, как можно сделать видимым лежащий в коротком ультрафиолете спектр поглощения фосфора. Способ состоит в том, что фосфор наносится на поверхность стеклянной пластины, которая и освещается коротким ультрафиолетом. Благодаря этому на фотографический слой (на обратной стороне пластины) попадает лишь видимое или длинноволновое ультрафиолетовое излучение, преобразованное фосфором из коротковолнового ультрафиолета¹⁸.

Что касается коэффициента полезного действия фосфоров, можно считать несомненным, что квантовый выход (т. е. число испущен-

ных квантов, приходящееся на один поглощенный) близок к единице, подобно тому как это имеет место при флуоресценции газов. В табл. 4 приведены некоторые относящие сюда данные. Максимально возможная энергетическая отдача фосфора определяется отношением ν_2/ν_1 , где ν_1 — поглощаемая, а ν_2 — испускаемая частота, или соответствующим отношением длин волн: λ_1/λ_2 .

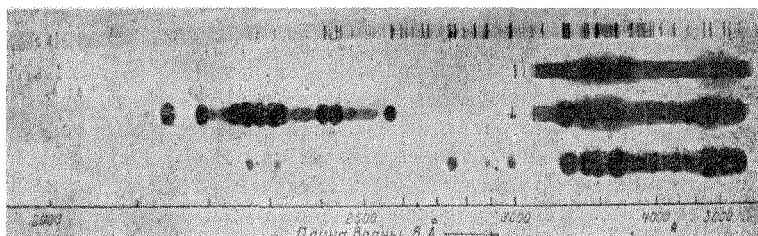


Рис. 9. Флуоресценция вольфрамата кальция с и сернистого цинка *d*, *a* — непосредственная фотография возбужденного спектра, *b* — фотография того же спектра после фильтрации через прозрачную стеклянную пластинку.

ТАБЛИЦА 4

Свойства некоторых фосфоров

Фосфор	Излучение, возбуждающее свечение	Квантовый выход	Энергетиче- ский выход	Светоот- дача	Литература
Сернистый цинк .	$\lambda = 3650/63$	100	70	230	A. Dresler, Licht, 1933, № 9 и 10.
Родамин в глип- тале	$\lambda = 5770/90$	50	48	94	Там же
Родамин в воде, концентрация 10^{-5} г/см ³ . .	100-ваттная лампа накали- вания	—	25—50	—	S. J. Wawilow, Z. Physik, 1924, № 22, стр. 266.
Флуоресцеин в воде, концентра- ция 10^{-5} г/см ³	100 ваттная лампа накали- вания	—	60—80	—	Там же
Сернистый цинк .	α -лучи	—	80	—	P. M. Wolf и N. Riehl, Ann. Physik, 1931, № 1, стр. 103.

Если имеется фосфор, излучающий в зеленой части спектра ($\sim 5000 \text{ \AA}$), то при возбуждении резонансной линией ртути $\lambda = 2537 \text{ \AA}$ можно ожидать выхода в 50%. Так как, с другой стороны, известны способы возбуждения резонансных линий с высоким выходом (газовый разряд, см. сказанное выше о натрии), то с помощью ртутных ламп и трансформации света посредством фосфоров можно получить весьма высокую отдачу (табл. 5, предпоследний столбец).

Спектральный состав света, получаемого от лампы с флуоресценцией, показан на рис. 10. В спектре обнаруживаются как ртутные линии, так и сплошные участки излучения фосфора. Существуют фосфоры, полосы испускания которых лежат в желто-красной области, так что комбинация их излучения с зелеными и голубыми линиями ртути может дать источник белого света.

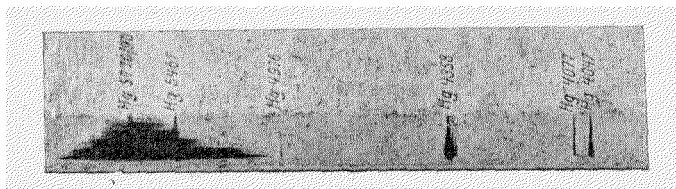


Рис. 10. Спектр ртутной лампы, использующей флуоресценцию. Снято с помощью ступенчатого фильтра.

Лампы с флуоресценцией, как и вообще лампы газового разряда, находятся еще в начальной стадии своего развития. Исследование всех схематически намеченных здесь возможностей добывания света за шесть лет, истекших с момента начала разработки этой области, конечно, не могло быть проведено с достаточной полнотой. Соответственно мало и имеющееся сейчас количество новых технических источников света, во всяком случае по отношению к многообразию имеющихся возможностей. Задерживающим образом на развитие новых источников света влияло и то обстоятельство, что свойства новых источников света, основанных на явлениях газового разряда как в отношении спектрального состава излучения, так и в смысле электрических характеристик, сильно отличаются от таковых ламп накаливания. Это обусловило необходимость разыскания новых путей для их практического применения. Должны были быть изменены и способы измерения светового потока и расхода мощности. Особенности затруднения представляют измерения этого последнего рода при работе на переменном токе и включении лампы с дросселем; обычные методы измерений не дают надежных результатов¹⁹. В конце концов наилучшим оказался калориметрический метод.

Техническое развитие новых источников света, как уже было указано, тесно связано с экономическими соображениями, диктуемыми совершенно несущественными с научной точки зрения, но практически решающими факторами (например стоимость электро-

энергии). Поэтому рассмотрение вопроса об источниках света будущего представляется нам здесь неуместным.

Наш краткий обзор следует дополнить указанием некоторых деталей устройства различных типов новых источников света.

Исходным пунктом развития источников света с газовым разрядом явилась разработка новых накаливаемых оксидных катодов, устойчивых в условиях газового разряда²⁰. Основное преимущество этих катодов заключается в понижении „катодного падения“ (достигавшего в случае холодных металлических электродов 100—300 В) до нескольких вольт. Благодаря этому оказалось возможным:

- 1) строить лампы, работающие при обычном сетевом напряжении, и
- 2) повысить плотность разрядного тока, не опасаясь поглощения газа в разрядной трубке распыляющимся материалом электродов.

В некоторых случаях электроды подвергаются накаливанию в течение долгого времени. В других необходимо лишь кратковременное разогревание их для зажигания разряда. Наконец, иногда электроды вообще не разогреваются извне, и накаливание их осуществляется самим разрядом (нагревание с помощью анодного падения).

Лампы, используемые для рекламных целей, в которых вследствие большой длины разрядного промежутка необходимо применение напряжений, много более высоких, чем сетевое, благодаря чему величина катодного падения оказывается малой по отношению к полному напряжению, строятся по большей части без оксидных электродов.

Для целей освещения в настоящее время широко используются два типа ламп газового разряда: натровые лампы и ртутные лампы высокого давления. Эти источники в известном смысле дополняют друг друга, так как разряд в парах натрия применяется по преимуществу для маломощных, разряд же в парах ртути — для крупных ламп. Это разделение имеет естественное основание. Яркость свечения и плотность тока в натровых лампах невелики; при увеличении плотности тока светоотдача натрового разряда понижается вследствие увеличения возбуждения линий, лежащих вне видимой области. Для того чтобы получать с натровыми лампами большие световые потоки, необходимо увеличивать размеры ламп, что является неудобным при их использовании.

В случае ртутных ламп высокого давления плотность свечения оказывается приблизительно в 10 раз выше. С увеличением плотности тока в этом случае повышается как плотность свечения, так и светоотдача, так что более экономичными оказываются крупные лампы.

Спектральный состав излучения натровых и ртутных ламп обуславливает известные ограничения их применения. Натровая лампа (спектр ее дан в табл. 3) может быть применена во всех тех случаях, когда необходимо иметь достаточно яркое освещение и большую резкость видения и, с другой стороны, несущественно различие окраски предметов, ртутная лампа высокого давления (спектр см. на рис. 11) — тогда, когда необходимо более сильное освеще-

ние и в то же время не играет роли изменение окраски (вследствие отсутствия в спектре ртути красных линий) предметов. Перечислим некоторые из основных областей применения натровых и ртутных ламп. Натровые лампы: освещение автомобильных дорог, рельсовых путей, заводских помещений, в которых ведутся тонкие работы, и световые рекламы. Ртутные лампы высокого давления: освещение мест с большим движением и больших фабричных помещений, крупные осветительные установки, особенно для зданий и зеленых площадей (интенсивные зеленые линии в спектре

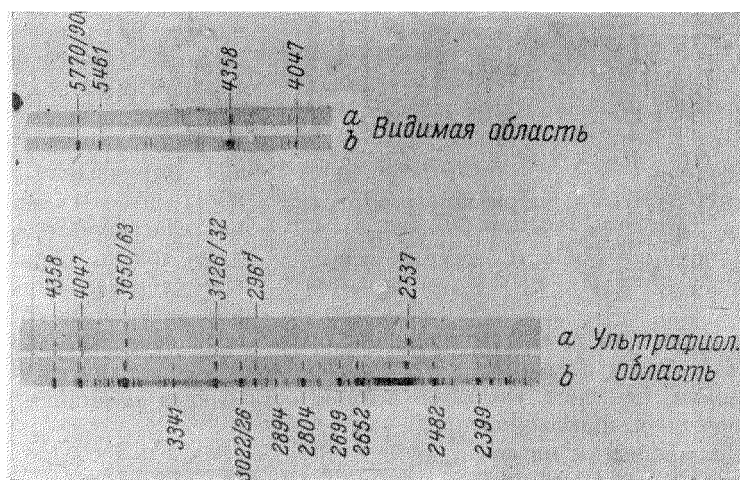


Рис. 11. Спектр разряда в парах ртути: *a*—низкое давление, *b*—высокое давление

ртути). Для освещения шоссежных дорог ртутные и натровые лампы уже приобрели права гражданства. Число световых точек с новыми лампами еще невелико по сравнению с общим их числом, но обнаруживает тенденцию к быстрому росту.

Технические натровые лампы, работающие на переменном токе, мощностью в 70 W потребляют 1,15 А при 50—55 В; полный световой поток составляет 3 000 Лм. Помимо этого типа, существует другой, при мощности в 120 W дающий 6 000 Лм. Светоотдача натровых ламп лежит между 43 и 50 Лм/Вт. Диаметр 70-ваттной натровой лампы (имеющей форму цилиндрической трубки) составляет 20 мм; температура ее в рабочем состоянии равна 280°. Для поддержания потерь тепла на низком уровне эта трубка помещается внутри двойной стеклянной оболочки, состоящей из одного открытого и одного закрытого стеклянного цилиндра (рис. 12); пространство между основной трубкой и цилиндрами эвакуируется.

В основной трубке, помимо натрия, содержится инертный газ под давлением в несколько мм Hg. Пока трубка не разогрелась, в ней светится только газ. Натровое свечение появляется постепенно по мере разогревания трубки и вызываемого этим повыше-

ния давления паров натрия. В конце концов свечение газа полностью исчезает. Один из оксидных электродов лампы при ее включении подвергается разогреванию извне. При работе в сети для этой цели служит понижающий трансформатор, включаемый, как

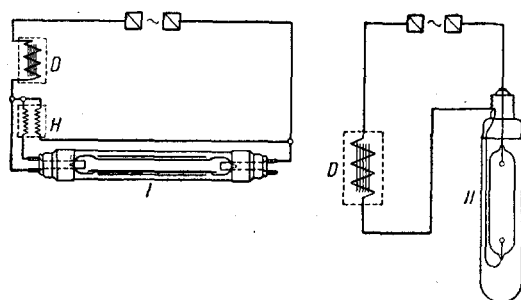


Рис. 12. Включение натровой (I) и ртутной высокого давления (II) ламп.

I — натровая лампа, II — ртутная лампа, D — дроссель, H — трансформатор накала

можно видеть на рис. 12, параллельно лампе и последовательно дроссельной катушке D. При включении лампы сетевое напряжение падает на первичной обмотке трансформатора, и электрод разогревается. После зажигания и установления нормального режима работы лампы на трансформаторе падает только нормальное рабочее напряжение, равное 50 — 55 В.

Расходуемая им при этом мощность оказывается настолько малой, что введение в цепь реле для выключения трансформатора является излишним, особенно учитывая возможность отказа зажигания при выключенном трансформаторе.

Подводимая к натровой лампе мощность расходуется следующим образом: 14% составляет проходящее сквозь стекло излучение паров натрия (табл. 3), 10% составляет выходящее наружу излучение оксидных электродов, 35% приходится на излучение самого стекла; потери тепла на конвекцию и теплопроводность составляют 41%.

Лампы с разрядом в парах ртути принадлежат к числу наиболее давно известных. Лампы низкого давления используются для рекламных целей уже более чем в течение 10 лет, кварцевые лампы высокого давления применяются в терапии с 1908 г. Исследование разряда в парах ртути с точки зрения светотдачи показало, что максимум ее наблюдается при низком давлении и малой плотности тока. При увеличении давления (рис. 13) после понижения светотдачи наступает новый ее подъем. В этой области давлений, простирающейся от 100 мм Hg до многих атмосфер, и работают ртутные лампы высокого давления.

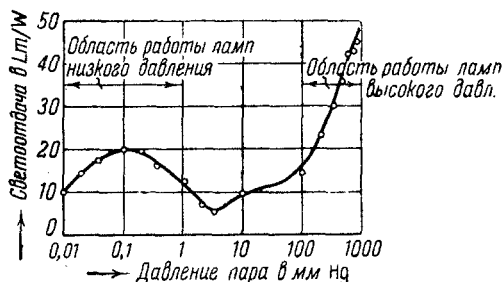


Рис. 13. Светотдача разряда в парах ртути в зависимости от давления пара.

ТАБЛИЦА 5
Свойства главнейших источников света

Способ возбуждения свечения	Т и п ы л а м п			Световой поток в Лм *	Светоотдача в Лм/Вт *	Яркость свечения
Температурное излучение твердого тела	Газокалильные лампы	Лампы накаливания	Угольная нить	214— 865	1,26	6
			Старые лампы с зигзагообразной нитью	50— 500	3,3	71
			Лампы с спиральной вольфр. нитью	160— 200	6,7	—
			Лампы с спиральной вольфр. нитью	160— 1 000	6,3	8,2
Одновременное свечение накаливаемого твердого тела и газовый разряд	Количество температурного излучения	большое	Лампы с спиральной вольфр. нитью	125— 1 250	10,9	240
			Лампы с спиральной вольфр. нитью	70— 720	7—12	145— 318
			Лампы с спиральной вольфр. нитью	400—1 000 000	6,7—32	565—3 600
			Лампы с спиральной вольфр. нитью	400— 10 000	До 30	2 000—3 000
Газовый разряд	Излучение положительного столба	малое	угельная дуга	5 000— 18 850	7—30	18 000
			Лампы солнечного света	—	Главным образом в ультрафиолете	
			Низкое давление, высокое напряжение	250 (на 1 м)	3— 6	0,05—0,1
			Низкое давление, сетевое напряжение	200—400 (на 1 м)	1— 3	0,05—0,1
Газовый разряд	Отрицательное свечение Ne	Низкое давление Hg с фосфорами	Ne Hg	в завис. от разм.	10—15	1—2
			CO ₂ N ₂	10—19	1—2	
			Na	3 000— 6 000	40—50	14
			Высокое давление Hg	в завис. от разм.	25—40	0,5—2
Газовый разряд	Отрицательное свечение Ne	Низкое давление Hg с фосфорами	10 000—50 000	36—50	180	
			1,5	0,5	0,02—0,03	
			1,5	0,5	0,02—0,03	
			1,5	0,5	0,02—0,03	

*Имеются в виду гефнеровские люмены

*Имеются в виду гефнеровские люмены

Эти лампы строятся на мощности в 275 W (10 000 Lm), 550 W (20 000 Lm) и 1050 W (53 000 Lm). Их световотдача составляет

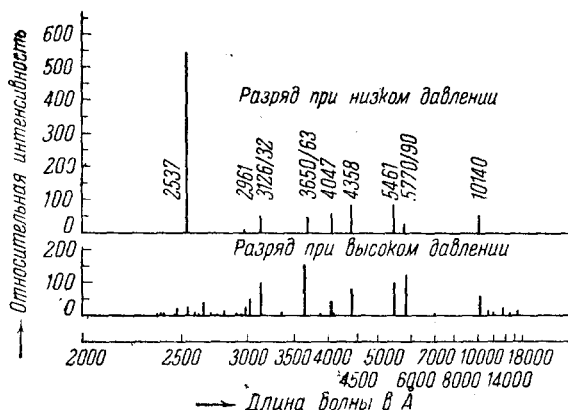


Рис. 14. Распределение энергии в спектре ртутных ламп низкого и высокого давления при одинаковом полном излучении.

от 35 до 50 Lm/W. Оксидные электроды этих ламп не предназначены для накаливания извне. Лампа через дроссель непосредственно включается в сеть, как показано на рис. 12, II. Этот тип ламп также имеет газовое наполнение. Плотность ртутного пара составляет в рабочих условиях около $27 \cdot 10^{19}$ атомов на 1 см^3 , что соответствует давлению около 4 ат. Стеклопная оболочка лампы имеет температуру свыше 300° . Разряд имеет форму ярко светящегося столба, проходящего посредине трубки. Собственно разрядная трубка в лампах этого типа окружается второй, служащей для защиты от потери тепла. Спектры ртутных ламп низкого и высокого давления в схематическом виде приведены на стр. 14.

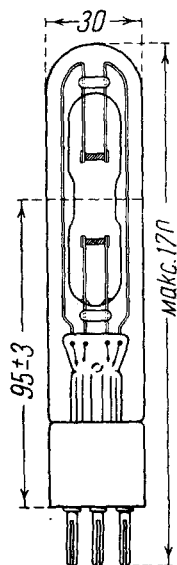


Рис. 15. Натриевая спектральная лампа для переменного тока.

Из ламп, предназначенных для научных и технических исследований, следует отметить так называемые спектральные лампы. Они представляют собой небольшие лампы, наполненные тем или другим газом или паром. Рис. 15 изображает натриевую спектральную лампу. Подобным же образом строятся лампы с парами кадмия, ртути, цинка, таллия, рубидия, цезия, калия или с неона, аргон и гелием. С помощью этих ламп можно получить монохроматическое излучение в любой области спектра. ²²

Из других получивших техническое распространение ламп газового разряда должны быть

упомянуты так называемые точечные лампы, т. е. лампы с суженной областью свечения,²³ наполненные Ne, Hg или N₂, затем лампы с углекислым газом для получения белого света, натровые лампы для телевидения, а также индикаторные лампы.

Наш обзор мы закончим уточнением свойств главнейших источников света, приведенном в табл. 5.

Какие из многих описанных источников света будут играть главную роль в светотехнике будущего, в частности проникнут ли новые источники света в области, принадлежащие сейчас лампам накаливания, в данный момент еще нельзя сказать. Во всяком случае можно быть уверенным в одном, — в том, что обогащение светотехники новыми источниками света в виде ламп газового разряда приведет к ее дальнейшему развитию, основание которому было положено в течение последних десяти лет благодаря сотрудничеству физики, химии, физиологии, психологии и экономики.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. N. Goldstein u. F. Putnoky, Licht u. Lampe **19**, 12, 31, 1277, 1930; **20**, 5, 25, 1931; **21**, 347, 364, 381, 1932.
2. W. Ostwald, Physik. Farbenlehre, S. 50, Leipzig 1919.
3. A. König u. Diterici, Z. Psychol. **4**, 241, 1892.
4. W. D. Wright, Trans. Opt. Soc. Lond. **30**, 141, 1928; **31**, 201, 1929; J. Guild, Phil. Trans. A **230**, 149, 1931; D. B. Judd, J. Opt. Soc., **23**, 359, 1933.
5. W. Arndt, Licht, **3**, 231, 1933; W. Arndt u. A. Dresler, Licht, **4**, 122, 143, 1934; P. J. Bouma, Ingenieur. A **49**, 31, 243, 290, 1934.
6. Geiger u. Scheel, Handb. d. Phys., **19**, 1, 1928; **21**, 199, 1929.
7. B. M. Knoll, F. Ollendorf, R. Rompe, Gasentladunstabellen, Berlin, 1935.
8. H. Krefft, Naturwiss. **19**, 269, 1931; Z. Physik, **77**, 752, 1932.
9. Pirani u. R. Rompe. Kinotechnik, **15**, 131, 1933.
10. P. Pringsheim, Fluoreszenz und Phosphoreszenz, S. 166, 3-e Aufl. Berlin 1928.
11. F. L. Mohler u. C. Boeckener, Bur. Stand. Journ. Res. **7**, 751, 1931;
12. E. L. Nichols и сотрудн. Phys. Rev. **17**, 453, 1921; **19**, 300, 1922; **22**, 420, 1923; **25**, 375, 1925; M. L. Phillips, Phys. Rev., **32**, 832, 1928.
13. C. Bol, Licht u. Lampe, **24**, 177, 1935.
14. Geiger u. Scheel, Handb. d. Phys., **21**, 247, 1929.
15. M. Pirani, Z. techn. Phys., **11**, 482, 1930; H. Krefft, M. Reger u. R. Rompe, Z. techn. Phys. **14**, 242, 1933.
16. R. W. Pohl, Naturwiss. **16**, 477, 1928; W. Koch u. R. W. Pohl, Gött. Nachr. **1**, 6 1929.
17. Wien-Harms, Handb. d. Experimentalphys. **23**, T. 1 u. 2. Leipzig 1928.
18. G. Heyne u. M. Pirani, Z. techn. Phys., **14**, 31, 1933; Techn. Wiss. Abh. a. d. Osram-Konzern, **3**, 56, 1934.
19. H. Ewest, Z. techn. Phys., **14**, 478, 1933; Techn. Wiss. Abh. a. d. Osram-Konzern, **3**, 57, 1934.
20. M. Pirani, Elektrotechn., Z. **51**, 892, 1930.
21. H. Krefft u. E. Summer, Licht **4**, 1, 23, 86, 105, 1934.
22. E. Lax u. M. Pirani, Unterrichtsbl. f. Math. u. Naturwiss. **41**, 91, 1935.
23. M. Pirani, Techn.-Wiss. Abh. d. Osram-Konzern **2**, 39, 1931.