

ФИЗИКА И ТЕХНИКА ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ЛАМП

В. А. Фабрикант

«Не знаю, могли бы изобретатели придумать что-нибудь лучше свечки, которая горела бы без помощи щипцов».

Гёте

1. ВВЕДЕНИЕ

В 1938 г. на Всемирной выставке в Нью-Йорке для освещения советского и других павильонов были применены новые источники света, названные американцами флуоресцентными или сокращённо —

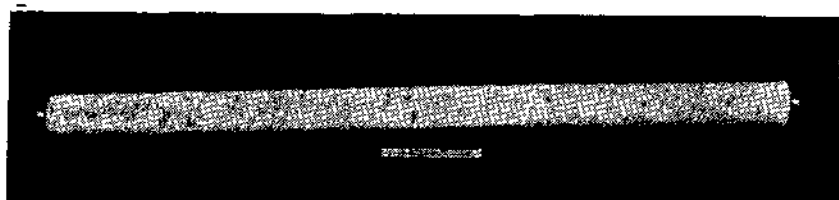


Рис. 1. Внешний вид люминесцентной лампы.

ф-лампами¹. Правильнее эти лампы называть люминесцентными, так как в них используется свечение люминофоров. Люминесцентные лампы по своему внешнему виду резко отличаются от ламп накаливания и представляют собой длинные, равномерно светящиеся трубки с четырьмя контактами в виде штырьков на концах (рис. 1). Производство люминесцентных ламп, несмотря на войну, вернее даже благодаря войне, чрезвычайно быстро стало расти: 1938 г. — 200 000 шт., 1939 г. — 1 600 000 шт., 1940 г. — 7 100 000 шт., 1941 г. — 19 000 000 шт., 1942 г. — 30 000 000 шт. и 1943 г. — 40 000 000 шт.

Построен специализированный завод для изготовления люминесцентных ламп с проектной мощностью 200 000 шт. ламп в день. Десятки фирм занялись изготовлением принадлежностей для люминесцентных ламп. В общем, безусловно речь идёт о рождении новой крупной отрасли промышленности и о настоящей революции в области техники освещения.

У нас в Советском Союзе первые люминесцентные лампы современного типа были построены в начале 1940 г. сотрудниками Всесоюзного электротехнического института (ВЭИ) Ф. А. Бутаевой и В. И. Долгополовым.

В настоящее время Всесоюзный электротехнический институт, Московский электроламповый завод и Физический институт Академии наук СССР ведут ряд работ, связанных с развёртыванием производства люминесцентных ламп.

Цель настоящего обзора заключается в том, чтобы дать возможно более полное представление о свойствах люминесцентных ламп и, главное, разобрать все основные физические процессы, определяющие эти свойства. Мы попытаемся проследить, как микрохарактеристики отдельных элементов люминесцентной лампы связаны с такими макроскопическими характеристиками ламп, как светоотдача.

Конечно, перед тем как говорить о люминесцентных лампах, следует напомнить причины, сделавшие необходимым появление новых источников света на смену лампам накаливания. Также необходимо несколько более подробно рассмотреть вопрос об идеальном источнике света. Ясно, что универсального идеального источника света нет и не может быть, но, с другой стороны, «если не знаешь, в какую гавань направиться, не может быть попутного ветра» (Сенека).

2. НЕДОСТАТКИ ЛАМП НАКАЛИВАНИЯ

Прежде всего остановимся кратко на причинах, делающих лампу накаливания нерациональным источником света, нуждающимся в замене. Основной недостаток лампы накаливания, как известно, это низкий коэффициент полезного действия. В табл. 1 приведены данные о балансе энергии в лампах накаливания мощностью 100 W, со сроком службы 1000 часов². В табл. 1 под видимым излучением

Таблица 1

Баланс энергии в лампах накаливания

Распределение энергии	Пустотная лампа — прямая нить	Лампа с аргоном — обыкновенная спираль	Биспиральная лампа с аргоном	Лампа с обыкновенной спиралью — криптон-ксенон
Видимое излучение . .	7	10	12	13
Невидимое излучение	86	68	74	76
Потери в держателях	7	3	2	2
Потери в газе . .	0	19	12	9
Всего	100	100	100	100

понимается область спектра, примерно, от 0,40 до 0,75 μ . Невидимое излучение представляет собой, по существу, почти целиком инфракрасные лучи. Таким образом, лампа накаливания весьма экономична, как источник инфракрасных лучей. Последнее обстоятельство и вызвало широкое применение ламп накаливания для сушки различных предметов³. Однако из табл. 1 следует, что как источник видимого света лампа накаливания значительно менее экономична. При этом важно отметить, что световой кпд лампы накаливания несравненно ниже 12%, соответствующих доле энергии, приходящейся на видимую часть спектра. Напомним, что световым кпд называется отношение светового потока, даваемого источником света, к максимальному значению светового потока, которое может быть получено при той же затрате мощности². В определении светового кпд весьма существенную роль играет ход кривой спектральной чувствительности глаза в пределах видимого спектра. Эта кривая имеет резкий максимум для длины волны 0,556 μ . Коэффициент видимости для 0,556 μ принимается равным единице. Наибольший световой поток получится, естественно, при превращении всей энергии в излучение с этой длиной волны, при этом каждый ватт энергии превратится в 621 люмен светового потока. Если мы сравним с этой цифрой светоотдачу 100-ваттной лампы накаливания 15,5 $лм/вт$, то получим световой кпд, равный всего лишь 2,5%!

3. ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ «ИДЕАЛЬНОГО» ИСТОЧНИКА СВЕТА

С точки зрения экономичности идеальным был бы источник монохроматического зелёного света с длиной волны 0,556 μ . Однако, широкое применение такого источника света натолкнулось бы на серьёзные трудности. Дело заключается в том, что нам важно не только количество света, даваемого источником, но и его качество, т. е. спектральный состав. Обычные газосветные лампы, в особенности натриевые, не могли найти себе достаточно широкое применение как раз ввиду неудовлетворительного спектрального состава даваемого ими света. При монохроматическом свете пропадает всякое различие цветов освещённых предметов. Если же свет не монохроматичен, но состоит из небольшого числа спектральных линий, то происходит сильное искажение видимых цветов предметов. Человеческий глаз приспособился к соотношениям цветов, возникающим при освещении предметов дневным или солнечным светом. Опыт показывает также, что человеческий глаз в известной мере привык к искажению цветов при освещении предметов жёлто-красным светом ламп накаливания. Однако, в ряде случаев искажение цветов при освещении лампами накаливания является недопустимым. Когда важно точное различие цветов, возникает сложная проблема искусственного дневного света (текстильная промышленность, полиграфия, музеи и т. д.). За эталон дневного света принят источник С со спектраль-

ным распределением энергии, близким к распределению энергии в спектре абсолютно чёрного тела при 6500°K (рис. 2)⁴. Необходимо подчеркнуть, что для создания искусственного дневного света нужен источник, близкий к источнику S по спектральной характеристике, а не только по своему цвету. Два источника, близких по цвету и изображаемых в цветовом треугольнике Максвелла близкими точками, могут очень резко различаться по своим спектральным свойствам. Например, источник, испускающий две спектральные линии, соответствующие дополнительным цветам (красный, зелёный), и источник, испускающий непрерывный спектр. При освещении белой поверхности такими источниками в обоих случаях поверхность сохранит свой цвет, но как только мы осветим ими

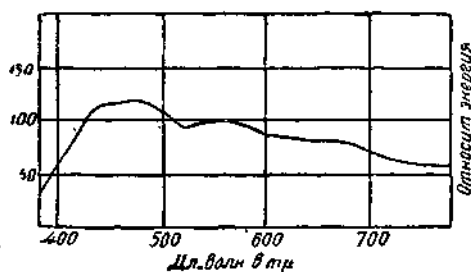


Рис. 2. Распределение энергии в спектре источника S .

какие-либо разноцветные объекты (человеческие лица, окрашенные ткани, картины и т. д.), сразу же возникнут резкие различия в виде этих предметов. Бедность спектра линейчатого источника проявится в выпадении одних цветов и неестественно высокой яркости других. Поэтому для правильной оценки цветовых свойств источника света

необходимо либо измерять распределение энергии в спектре, либо, что более практично, оценивать цветопередачу ряда стандартных цветных образцов при освещении исследуемым источником света⁵. Для наглядного изображения искажений цветопередачи удобнее всего пользоваться равноконтрастным графиком, построенным по Джемму⁶. На этом графике, в отличие от обычного треугольника Максвелла, одному и тому же расстоянию между двумя точками соответствует одно и то же различие в цвете, независимо от области, в которой лежат эти точки. На рис. 3 изображён равноконтрастный график. По краям нанесены монохроматические цвета спектра. Прямая, соединяющая 700 и 400 $m\mu$, соответствует пурпурным цветам. Точки C_1 — белый, C_2 — жёлтый, C_7 — красный, C_8 — малиновый, C_{18} — синий, C_{15} — голубой и C_{22} — зелёный — образцы при освещении стандартным источником дневного света S . Точки H изображают цвета тех же образцов при освещении лампой накаливания, точки P — ртутной лампой и точки $P+H$ — комбинацией из лампы накаливания и ртутной лампы. Мы видим, что при освещении лампой накаливания белый образец становится оранжевым (смещается в сторону 610 $m\mu$), при освещении ртутной лампой — зеленовато-голубым (смещается в сторону 470 $m\mu$). Жёлтый образец C_2 при лампе накаливания краснеет, а при ртут-

ной — зеленеет. Не менее значительны изменения цвета других образцов.

В идеальном случае различие в цветовых характеристиках образцов при освещении эталоном и данным источником света не должно превышать для всех образцов 1—2 порогов (порог — наименьшее различие в цвете, обнаруживаемое глазом).

Если мы теперь вернёмся к вопросу о предельной светоотдаче источника света, уже учтя сформулированные требования к качеству

света, то получим цифры значительно более низкие, чем 621 лм/вт . Представим себе источник света, превращающий всю подводимую мощность в излучение с длинами волн, лежащими только в пределах видимой части спектра, и пусть распределение энергии в этой части спектра будет таким же, как у абсолютно чёрного тела (рис. 4). Тогда

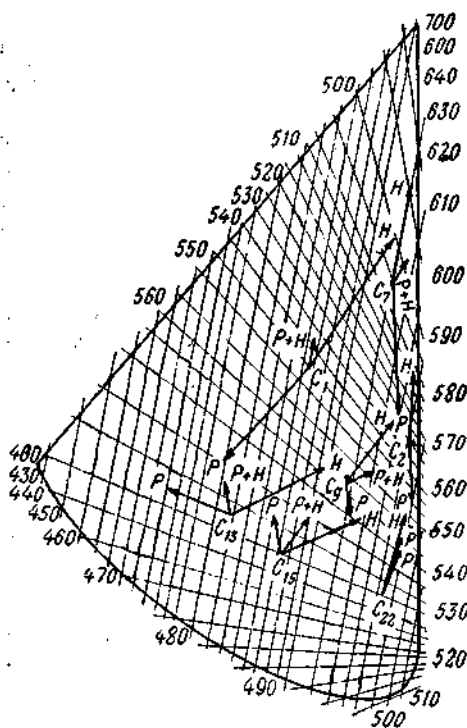


Рис. 3. Равноконтрастный график по Джелду.

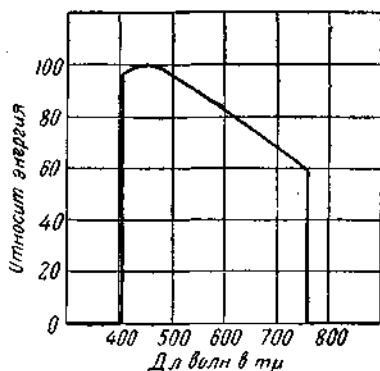


Рис. 4. Распределение энергии в спектре «идеального» источника света.

для такого идеализированного источника можно рассчитать светоотдачу, которая будет различной для различных значений температуры абсолютно чёрного тела, т. е. по существу для различных цветовых температур источника света.

На рис. 5 изображён ход светоотдачи с цветовой температурой¹. Мы видим, что максимальная светоотдача составляет примерно 220 лм/вт , т. е. почти в 3 раза меньше максимальной светоотдачи для монохроматического источника света.

Ясно, что значения светоотдачи, нанесённые на рис. 5, сильно зависят от установления пределов видимого спектра (0,4—0,7; 0,4—

0,75; 0,4—0,8; 0,38—0,76 и т. д.). Кривая рис. 5 соответствует пределам 0,4—0,76 μ . Ход кривой на рис. 5 показывает, что изменения цветовой температуры от 2500 до 8000° К мало влияют на светоотдачу, т. е. мы можем довольно сильно изменять цветовые свойства идеализированного источника, не изменяя его светоотдачи.

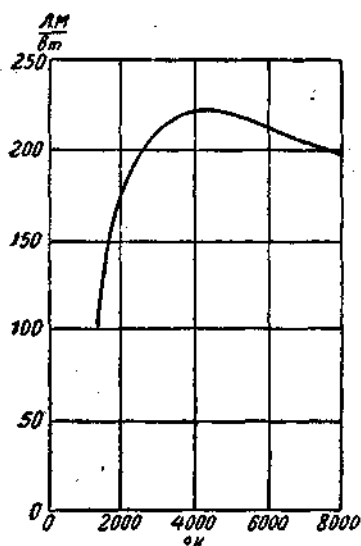


Рис. 5. Светоотдача, как функция цветовой температуры «идеального» источника света.

источника света как по экономичности, так и по своим спектральным свойствам.

Для большинства практических применений разумно идеалом считать источник с описанными выше свойствами, что соответствует предельной светоотдаче порядка 200 Лм/Вт. В тех же случаях, когда монохроматичность света является преимуществом (освещение автострад) или когда цветопередача не существенна (освещение больших цехов металлообрабатывающей промышленности, наружное освещение и т. д.), принципиальная граница для светоотдачи источника должна быть значительно выше.

Во всяком случае лампа накаливания весьма далека от идеального

4. НЕДОСТАТКИ ГАЗОСВЕТНЫХ ЛАМП

До 1938 г. разработка новых источников света шла, главным образом, по линии создания газосветных ламп, использующих видимое свечение газового разряда. Здесь был получен ряд серьезных результатов в смысле повышения экономичности и яркости, но с цветовыми характеристиками дело всё время обстояло весьма неблагоприятно. Высокая светоотдача, главным образом, достигалась за счёт предельной селективности источников света, т. е. благодаря линейчатой структуре их спектров (предельный случай — монохроматичная натриевая лампа).

Как мы указывали выше, линейчатый характер спектра крайне неприятен с точки зрения цветопередачи. При свечении газового разряда непрерывный спектр можно получить только при очень высокой степени ионизации газа, когда основную роль начинают играть процессы рекомбинации свободных электронов с ионами. Молер⁸ сделал любопытный подсчёт, показывающий, что при таких условиях разряд в парах цезия может оказаться источником белого света со светоотдачей порядка 180 Лм/Вт. Однако, построение лампы с парами цезия, работающей длительный срок при высокой температуре, представляет огромные чисто технологические трудности.

Цезий чрезвычайно химически активен и быстро разрушает стенки разрядной трубки. Так же практически пока мало интересны попытки применения молекулярных газов⁹. Другой, более реальный, но менее эффективный путь для получения источника света с должными цветовыми свойствами состоит в комбинировании газосветных ламп (ртутных ламп) с лампами накаливания. Такого типа установки были довольно широко распространены в США для освещения школ и других общественных зданий. Однако, это решение проблемы, конечно, сопряжено с большой потерей в экономичности и, главное, не даёт всё-таки хорошей цветопередачи. На графике рис. 3 точки $P-H$ изображают цвета образцов при освещении комбинированным источником света. Согласно законам смешения, точки, соответствующие цветам тест-объектов, при комбинированном освещении должны лежать на прямых, соединяющих точки P и H . Так как эти прямые не проходят через точки C , соответствующие правильным цветам тест-объектов, то ясно, что никакая (в смысле соотношения мощностей) комбинация ртутной лампы и ламп накаливания не может дать правильной цветопередачи.

5. СОЧЕТАНИЕ ЛЮМИНОФОРОВ С ГАЗОВЫМ РАЗРЯДОМ

Гораздо более плодотворным оказался путь, связанный с применением люминофоров в газосветных лампах. Как известно, спектры излучения твёрдых люминофоров представляют собой довольно резко ограниченные, но непрерывные полосы. Таким образом, люминофоры обладают спектральными свойствами, аналогичными свойствам того идеального источника света, о котором мы говорили выше. Излучение люминофоров сосредоточено в определенной спектральной области, но в пределах этой области присутствуют все длины волн.

Надо сказать, что идея применения люминофоров в сочетании с газовым разрядом имеет основательную давность. Еще Беккерель наблюдал свечение люминофоров в разрядных трубках¹⁰, а Купер-Юитт более 30 лет тому назад проводил опыты с флуоресцирующими рефлекторами, предназначенными для добавления красного света к зелёному свечению ртутной лампы¹¹. Затем, в течение ряда лет, успешные эксперименты по применению люминофоров вёл во Франции Клод со своими сотрудниками¹² и Рэндалл в Англии¹³.

Но, как мы уже подчеркивали вначале, настоящий размах практического применения люминесцентных ламп получило только начиная с 1938 г. Принцип действия газоразрядных ламп с люминофорами чрезвычайно прост. На стенки колбы лампы наносится тонким слоем какой-либо люминофор, светящийся под действием излучения газового разряда. При этом обычно используется для возбуждения люминофора ультрафиолетовая часть спектра излучения разряда. В том случае, когда люминофор используется только для исправления цветности лампы, видимое излучение разряда играет весьма существенную роль. Например, при исправлении цветности ртутных ламп высокого давления цинк-кадмий сульфид, нанесённый на вну-

треннюю поверхность наружной колбы, даёт ничтожную долю общего светового потока лампы. Светоотдача, по существу, целиком определяется в этом случае видимым излучением разряда. Ясно, что присутствие ярких линий в спектре излучения сильно портит цветовые характеристики лампы. Поэтому применение люминофоров

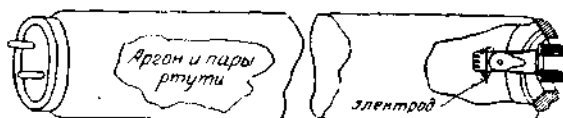


Рис. 6. Разрез люминесцентной лампы. Внутренняя поверхность покрыта люминофором.

для исправления цветности газоразрядных ламп, обладающих высокой светоотдачей самого разряда, является трудной задачей. До сих пор получены весьма ограниченные результаты в этом на-

правлении. Проще обстоит дело в том случае, когда видимое излучение самого разряда весьма слабо по сравнению с ультрафиолетовым излучением. Здесь можно создать такие условия, при которых почти весь световой поток лампы будет состоять из свечения люминофора. Роль газового разряда сводится только к генерации ультрафиолетового излучения, возбуждающего люминофор. Такого типа лампы и называются люминесцентными.

В люминесцентных лампах, получивших широкое распространение, использован электрический разряд в смеси паров ртути с аргонном и смесь люминесцирующих силикатов, вольфраматов и боратов (рис. 6). Мы последовательно рассмотрим отдельные элементы люминесцентных ламп и их взаимодействие между собой.

6. БАЛАНС ЭНЕРГИИ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА

Выход излучения в газовом разряде чрезвычайно сильно зависит от таких параметров, как давление газа и сила тока. При этом существенно различать резонансное излучение, испускаемое атомами газа при переходах на самый низкий энергетический (нормальный) уровень, и излучение, испускаемое при переходах между более высокими уровнями. Если мы грубо разобьём все уровни атома на три «этажа» (рис. 7), то наиболее интенсивные резонансные линии соответствуют переходам со второго этажа на первый, наиболее интенсивные нерезонансные линии — переходам с третьего этажа на второй. На рис. 8а весьма схематично изображён баланс энергии в положительном столбе газового разряда при различных давлениях, подсчитанный на основании обширного экспериментального материала Клярфельдом¹⁴. Потери на стенках состоят из энергии, отдаваемой стенкам ионами и метастабильными атомами; тепловые потери в объёме связаны с нагреванием газа за счёт упругих соударений электронов с атомами. Потери на стенках с ростом давления уменьшаются в связи с уменьшением длины свободного пробега ионов, что затрудняет попадание ионов на стенки.

Доля энергии, расходуемой на тепловые потери в объеме газа, имеет резкий максимум в области средних давлений. Выделяющееся при этом тепло благодаря теплопроводности газа также передается стенкам разрядной трубки.

Интересно отметить, что в области больших давлений η_0 резко снижается. Это связано с исчезновением разницы между электронной температурой и температурой газа и с установлением по оси разряда весьма высоких температур, порядка 7000°K .

Тепловые потери в объеме можно рассматривать, как своеобразный процесс теплопередачи от горячего электронного газа, «подогреваемого» электрическим полем разряда, к более холодному атомарному газу, на который электрическое поле непосредственно не действует.

Из диаграммы рис. 8а видно, что существуют две области давлений, оптимальных для генерации излучения в разряде.

В области низких давлений разряд особенно эффективен как источник резонансного излучения; в области высоких давлений, наоборот, особенно велик выход нерезонансных линий.

Нас будет интересовать в дальнейшем только разряд низкого давления. Рассмотрим кратко механизм возбуждения излучения в таком разряде.

7. МЕХАНИЗМ ВОЗБУЖДЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ В РАЗРЯДЕ

Как известно, схема основных энергетических превращений в разряде низкого давления довольно проста. Электрон приобретает запас кинетической энергии в электрическом поле разряда, затем соударяется с атомом и возбуждает его, т. е. переводит атом с более низкого энергетического уровня на более высокий. Возбужденный атом по истечении некоторого весьма небольшого промежутка времени (продолжительность жизни возбужденного атома 10^{-7} — 10^{-8} сек.) возвращается обратно на более низкий энергетический уровень, испуская при этом квант лучистой энергии. Однако, эта

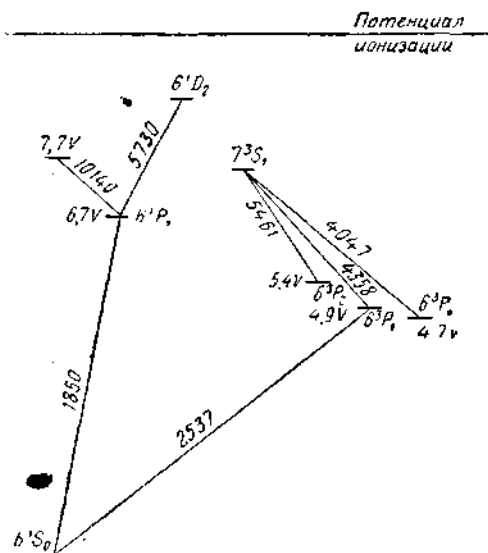


Рис. 7. Упрощенная схема энергетических уровней атома ртути.

простая схема усложняется рядом вторичных процессов, на которых мы остановимся несколько позже.

Очевидно, что в процессе возбуждения могут участвовать только электроны, обладающие энергией большей, чем потенциал возбуждения, равный расстоянию между энергетическими уровнями атома, выраженному в электрон-вольтах. Распределение электронов по энергиям носит максвелловский характер с электронной температурой в качестве параметра. Электронную температуру принято выражать в электрон-вольтах — 1 В соответствует 7800°K ¹⁶.

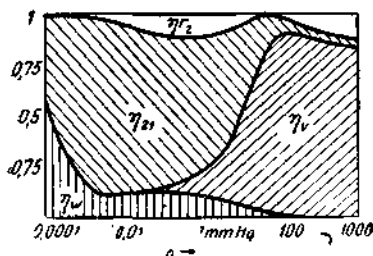


Рис. 8а. Баланс энергии в положительном столбе газового разряда.

η_r — доля мощности, превращаемая в резонансное излучение; η_v — внерезонансное излучение; η_g — тепловые потери в объеме газа; η_w — потери на стенках.

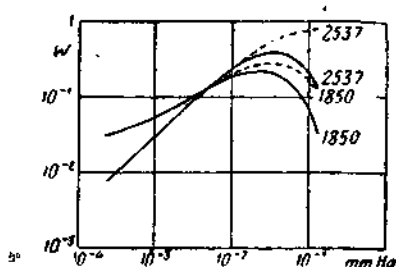


Рис. 8б. Интенсивность линий 1850 и 2537 Å.

Максимум максвелловской кривой соответствует энергии электронов, равной одной трети электронной температуры, выраженной в электрон-вольтах. В разряде почти всегда максимум кривой распределения лежит значительно левее потенциала возбуждения, так что в возбуждении атомов участвует лишь небольшая доля всех электронов. Чем ниже электронная температура, тем меньше эта величина.

С ростом давления при постоянной силе разрядного тока растёт концентрация нормальных атомов и электронов (в связи с уменьшением скорости дрейфа) и падает электронная температура¹⁷. В результате наложения этих взаимнопротивоположных эффектов, при определённом давлении наблюдается максимум произведения из концентрации нормальных атомов на число электронов, обладающих энергией, достаточной для возбуждения этих атомов. Это должно соответствовать максимуму излучения разряда в области низких давлений.

Абсолютная интенсивность излучения зависит весьма сильно от величины эффективного сечения атома для процесса возбуждения электронным ударом. Эффективное сечение атома имеет различные значения для переходов между различными уровнями и является функцией энергии возбуждающего электрона — «функция возбуждения». На рис. 9 приведены функции возбуждения для четырёх уровней атома ртути¹⁸. Все эти уровни принадлежат ко «второму

этажу» уровней атома ртути. С уровня 6^1P_1 начинается линия 1849 Å, а с уровня 6^3P_1 — линия 2537 Å; уровни 6^3P_2 и 6^3P_0 метастабильные.

Абсолютное значение эффективного сечения атома ртути в максимуме функции возбуждения уровня 6^1P_1 равно $15 \text{ см}^2/\text{см}^3$ (площадь всех мишеней при 0°C и 1 мм Hg — величина, обратная длине свободного пробега), что составляет примерно 15% от газокинетического сечения атома ртути для уровня 6^3P_1 , соответственно, $4 \text{ см}^2/\text{см}^3$ ¹⁹. Следует

указать, что имеющиеся в литературе данные для уровня 6^3P_1 противоречивы, но после внесения соответствующих поправок неплохо согласуются друг с другом²⁰. У атомов инертных газов сечения гораздо меньше, например у неона эффективное сечение для возбуждения составляет доли процента от газокинетического сечения²¹. Наоборот, у таких атомов, как натрий и калий, эффективность соударений ещё больше, чем у ртути. Грубо говоря, вероятность возбуждения убывает с увеличением потенциала возбуждения.

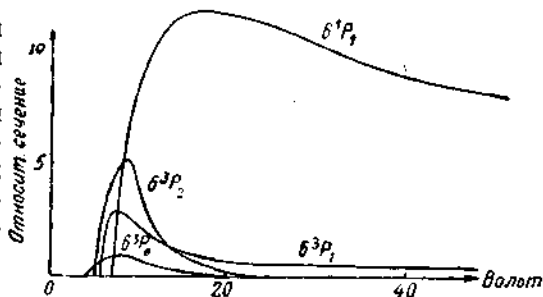


Рис. 9. Функции возбуждения атома ртути.

В отсутствии вторичных процессов эффективное сечение атома является единственной атомарной характеристикой, влияющей на интенсивность излучения газового разряда. Связь между макроскопическими характеристиками разряда и атомными константами может быть установлена только при условии, что известны электронные характеристики разряда, т. е. концентрация электронов и электронная температура.

Для разряда в парах натрия имеются наиболее полные данные об электронных и оптических характеристиках²². Для этого разряда получается прекрасное согласие между рассчитанными из атомных констант значениями абсолютных интенсивностей и экспериментальными данными²³.

К сожалению, ртутный разряд исследован гораздо менее обстоятельно. В работах, посвящённых абсолютным измерениям интенсивности резонансных линий, не всё благополучно с точки зрения методики. Нет прямых данных об интенсивности линии 1850 Å. Максимум интенсивности резонансного излучения получается в области давлений порядка 10^{-2} мм Hg , что качественно согласуется с теоретическими расчетами²⁴. На рис. 8b изображён ход интенсивности линий 1850 и 2537 Å, рассчитанный теоретически. Более точное сопоставление затруднительно, так как почти нет сведений

о концентрациях электронов и электронных температурах для тех же условий разряда, при которых производились измерения излучения. Например, в работе Фаунда и Хеннели²⁵ есть подробные данные об электронных характеристиках, но результаты измерений линии 2537 Å носят относительный характер.

8. РАЗРЯД В ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ЛАМПАХ КАК ИСТОЧНИК УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

До сих пор мы говорили об излучении разряда в чистых парах ртути. По ряду побочных причин, которые будут разобраны ниже, в люминесцентных лампах используется разряд в смеси паров ртути с аргоном. Давление аргона — порядка 3—4 мм Hg. Роль аргона в механизме излучения разряда ещё не выяснена полностью. Во всяком случае присутствие аргона затрудняет движение электронов и ионов, так как вызывает уменьшение длины свободного пробега. Последнее должно приводить к увеличению концентрации электронов (при постоянной силе тока) и к понижению электронной температуры.

При добавлении 4 мм аргона, согласно измерениям Ф. Бутаевой²⁶, происходят следующие изменения в разряде: концентрация электронов повышается на порядок с $9 \cdot 10^{10}$ до $2,6 \cdot 10^{11}$, а электронная температура снижается с 18 100 до 13 000°K. Температура стенок лампы при этом поддерживалась постоянной и равной 40°С, что соответствует давлению ртутных паров порядка 10^{-2} мм Hg. Сила тока также постоянная — 350 мА. Снижение электронной температуры должно изменять соотношение интенсивностей линий 1850 и 2537 в пользу последней.

На рис. 15 изображён выход излучения, как функция температуры стенок люминесцентной лампы²⁷. Мы видим, что 40°С (110°F) соответствуют оптимальным условиям для генерации резонансного излучения.

В табл. 2 приведены данные Тейера и Бэрнса²⁸ для распределения энергии в спектре газового разряда лампы диаметром 25 мм

Таблица 2

Выход спектральных линий в люминесцентных лампах

Ток в А	Температура стенок в °С	Доля мощности, превращённой в линию λ							Сумма	Доля на линию 2537	Люмен на ватт
		2537	3129	3651	4047	4358	5461	5780			
0,25	48	62	0,53	0,45	0,59	1,30	0,86	0,18	65,9	94	5,5
0,50	57	55	0,68	0,62	0,86	1,45	1,26	0,27	60,1	92	7,3
1,00	69	40	0,89	0,82	1,02	1,79	1,49	0,39	46,4	86	10,0

при трёх различных силах тока. В табл. 2 за 100% принята мощность, расходуемая в положительном столбе разряда. Из неё следует, что в данных условиях более 50% подводимой в положительный столб мощности превращается в линию 2537 Å и что эта линия составляет более 90% излучения разряда (последнее не точно, ибо не измерялась линия 1850 Å и инфракрасные линии).

Эти данные находятся в прекрасном согласии с общей картиной энергетического баланса разряда, изображённой на рис. 8 в начале настоящего раздела. Следует заметить, однако, что из-за сложности энергетических уровней ртути количественное теоретическое объяснение таких высоких значений выхода для линий 2537 Å, как приведённые в табл. 2, является далеко не тривиальной задачей.

Ведь, как видно из рис. 9, вероятность возбуждения обоих метастабильных уровней 6^3P_0 и 6^3P_2 примерно в два раза больше, чем вероятность возбуждения линии 2537 Å, начинающейся с уровня 6^3P_1 . Следовательно, если на возбуждение линии 2537 Å расходуется более 50% мощности, то на возбуждение метастабилей должно расходоваться более 100% мощности, а на возбуждение всех четырёх нижних уровней значительно более 150% подводимой мощности²⁹. В этом смысле в натриевом разряде дело обстоит совсем иначе: там находят себе простое объяснение даже значения для выхода излучения, близкие к 100%, поскольку нет метастабильных состояний. Противоречие, возникающее при попытке теоретически истолковать данные табл. 2, может быть разрешено только путём учёта ударов второго рода. При ударах второго рода метастабильные атомы ртути либо отдают свою энергию обратно электронам, либо переходят на уровень 6^3P_1 , превращаясь в излучающие атомы.

Возможно, что последний процесс играет значительную роль в механизме возбуждения линии 2537 Å. Присутствие аргона должно значительно повышать число ударов второго рода, испытываемых метастабильными атомами.

Во всяком случае приведённые данные свидетельствуют о том, что разряд в люминесцентных лампах является весьма экономичным источником коротковолнового ультрафиолетового излучения. Наоборот, как источник видимого излучения этот разряд не выгоден. В последнем столбце табл. 2 приведены значения светоотдач самого разряда, и мы видим, что эти цифры ниже даже светоотдач ламп накаливания.

Как уже указывалось выше, слабая интенсивность видимых линий также является преимуществом люминесцентных ламп. Наконец, из табл. 2 видно, насколько вредна форсировка режима ламп, — выход резонансного излучения резко падает и возрастает роль видимых линий. К этому вопросу мы ещё вернёмся в разделе, посвящённом выбору технических параметров люминесцентных ламп.

9. ЛЮМИНОФОРЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ЛАМПАХ

При выборе люминофоров для люминесцентных ламп приходится считаться с целым рядом обстоятельств. Прежде всего, эти люминофоры должны обладать большой чувствительностью к коротковолновому ультрафиолету. Затем эти люминофоры должны давать видимую люминесценцию с вполне определёнными спектральными характеристиками в смысле положения полосы люминесценции в спектре и распределения энергии в полосе. Наконец, люминофоры для ламп должны быть вакуумными, т. е. при введении их внутрь электровакуумного прибора, каким является люминесцентная лампа, они не должны разлагаться и должны быть достаточно стабильными в присутствии ртутного разряда. Последнее условие чрезвычайно усложняет подбор люминофоров для ламп. Зачастую приходится отказываться от весьма выгодных по своим оптическим характеристикам люминофоров, так как они не являются вакуумными в указанном смысле слова.

В настоящее время уже установлен асортимент люминофоров, используемых в люминесцентных лампах. В табл. 3 сведены основные характеристики этих люминофоров по работе Одей и Цизель³⁰.

Таблица 3

Основные люминофоры, применяемые в люминесцентных лампах

Люминофор	Цвет	Полоса возбуждения	Максимум чувствительности	Полоса испускания	Максимум испускания
CaWO_4	Синий	2200—3000	2720	3800—7000	4400
MgWO_4	Сине-белый	2200—3200	2850	3800—7200	4800
ZnSiO_3	Зелёный	2200—3960	2537	4500—6200	5250
ZnBeSiO_3	Жёлто-белый	2200—3000	2537	4500—7200	5950
CdBO_3	Розовый	2200—3600	2500	4000—7200	6150

Следует отметить, что коротковолновая граница полосы возбуждения 2200 Å определена условно, так как применявшаяся аппаратура не давала возможности продвинуться дальше в сторону коротких волн.

Как показывают измерения Биза³¹, выполненные при помощи вакуумного спектрографа, полоса возбуждения люминофоров простирается далеко за 1850 Å, причём даже наблюдается второй, более высокий, максимум чувствительности в области 1850 Å (см. рис. 10). К сожалению, данные Биза несколько противоречивы. У него наблюдается количественное расхождение между результатами измерения с вакуумным спектрографом и с монохроматором (для длины волн > 2200 Å).

Ф. Бутаевой³² проделаны эксперименты, правда, носящие косвенный характер, но указывающие весьма определённо на большую чувствительность люминофоров к линии 1850 Å. Ф. Бутаева поме-

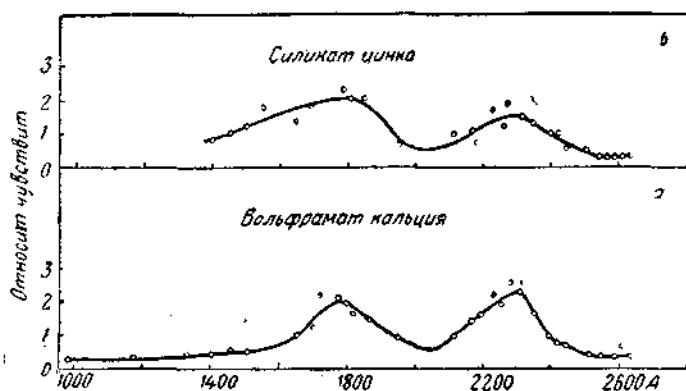


Рис. 10. Чувствительность люминофоров к короткому ультрафиолету.

щала образцы люминофоров на близком расстоянии от ртутной кварцевой лампы низкого давления и закрывала их фильтрами, пропускающими линию 2537 Å (от 33 до 50%) и отсекающими линию 1850 Å. Оказалось, что при закрывании такими фильтрами яркость люминофора уменьшалась в большее число раз, чем это следовало из коэффициента пропускания для линии 2537 Å. Например, при пропускании фильтра 33% яркость уменьшалась для некоторых люминофоров примерно до 26%, для других до 18% от начальной величины. Это свидетельствовало о том, что в возбуждении люминофоров существенную роль играет линия 1850 Å, отсекаемая фильтром. Как и следовало ожидать, все эффекты, связанные с линией 1850 Å, исчезали при достаточно большом расстоянии между лампой и образцом люминофора. Известно, что воздух сильно поглощает линию 1850 Å.

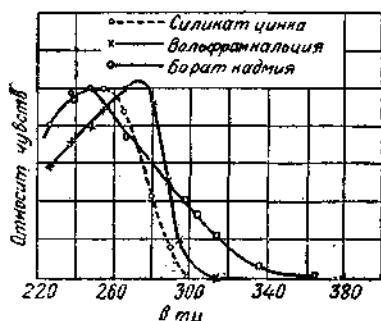


Рис. 11. Чувствительность люминофоров в области длин волн больше 2200 Å.

На рис. 11 приведены кривые спектральной чувствительности люминофоров в области длин волн больших, чем 2200 Å. Мы видим, что все они имеют максимумы чувствительности, лежащие близко от 2537 Å и, следовательно, должны хорошо возбуждаться этой спектральной линией. Полосы испускания люминофоров охватывают, как видно из табл. 3, весь видимый спектр. В табл. 4

Таблица 4

Распределение энергии в полосах люминесценции.

Люминофор	Длина волны максимума энергии	Интенсивность по отношению к максимуму				
		λ 4500	5000	5500	6000	6500 Å
CaWO_4	4400	98	60	24	8	2
MgWO_4	4800	86	97	56	26	9
ZnSiO_3	5250	1	33	48	4	0
ZnBeSiO_3	5950	1	9	68	99	55

приведены количественные данные о распределении энергии в полосах люминесценции, согласно Тетру и Берису.

На рис. 12 изображены в одном масштабе результаты измерений Ф. Бутаевой люминофоров, синтезированных в ВЭИ В. И. Долгополовым⁸⁴. Естественно, что на свойства люминофоров весьма сильно

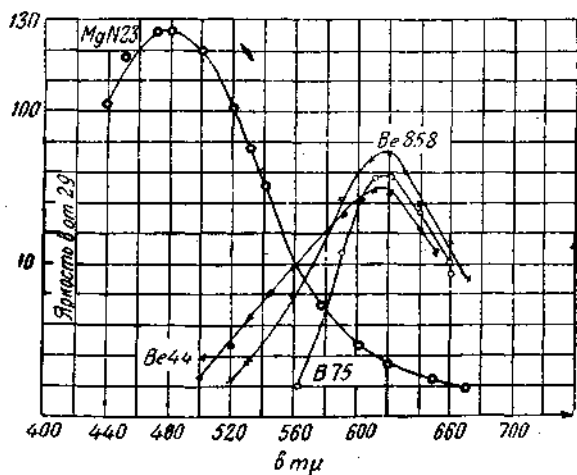


Рис. 12. Распределение энергии в спектральных полосах люминофоров.

MgN 23 — вольфрамат магния; Be 44 — цинк-бериллий силкат, активированный марганцем; Be 858 — то же, но с другим количественным составом (больше марганца, меньше бериллия), B 75 — борат калия.

оказывает влияние технология их изготовления. Очень опасно загрязнение люминофоров тяжёлыми металлами вроде железа, меди, свинца и т. д.

На рис. 13 изображён выход люминесценции в зависимости от процентного содержания загрязнения⁸⁸. Мы видим, что достаточны концентрации порядка 10^{-5} — 10^{-6} , чтобы вызвать заметное снижение выхода. Это обстоятельство заставляет предъявлять чрезвычайно

высокие требования к очистке исходных материалов для синтеза люминофоров. Большую роль также играет активатор — тяжёлый металл, придающий люминофору его специфические свойства. Таким активатором в силикате цинка (виллемите) и цинк-бериллий силикате служит марганец. Марганец вообще является распространённым активатором люминофоров, причём свойства люминофоров, активированных марганцем, очевидно, тесно связаны со свойствами иона марганца³⁵.

Существует определённая концентрация активатора, соответствующая максимуму выхода люминесценции. В случае силикатов эта концентрация порядка 10^{-3} ³⁶, однако, точное значение сильно зависит от ряда обстоятельств (состав основного вещества, режим прокалики и т. д.). Мы не можем здесь вдаваться в детали технологии люминофоров и поэтому ограничимся сделанными краткими замечаниями.

Теория твёрдых люминофоров, базирующаяся на представлениях об энергетических зонах твёрдого тела, находится ещё в зачаточном состоянии³⁷. Если эта теория и даёт известную качественную картину механизма возбуждения и излучения люминофоров, то, во всяком случае, все вопросы, так или иначе связанные с интенсивностью люминесценции, пока остаются без ответа. Объясняется это большой сложностью объекта. Поэтому синтез новых люминофоров идёт чисто эмпирическим путём, и удачный рецепт представляет секрет той или иной фирмы.

10. СЛОЙ ЛЮМИНОФОРА В ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ЛАМПАХ

Люминофор наносится на внутренние стенки лампы в виде слоя мелкокристаллического порошка. Размер отдельных кристалликов порядка микрона. Размер кристалликов существенным образом влияет на выход люминесценции. В оптимальном случае на 1 см^2 поверхности лампы приходится примерно $1-2 \text{ мг}$ люминофора, что соответствует $\sim 10^9$ кристалликов. Кристаллики при этом нагромождаются друг на друга (pilling)³⁸. Оптические свойства лампы зависят весьма сильно от структуры и толщины слоя люминофора.

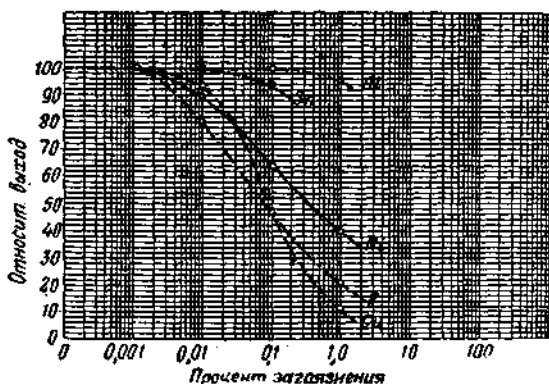


Рис. 13. Влияние загрязнений на выход люминесценции для бората кадмия, активированного марганцем.

При слишком тонком слое не происходит полного поглощения возбуждающего ультрафиолета, при слишком толстом слое уже начинает сказываться вредное поглощение света самой люминесценции в слое. Последнее усугубляется тем обстоятельством, что слой люминофора в лампах работает на просвете, т. е. свечение наблюдается со стороны, противоположной возбуждаемой. Грубо говоря, можно рассматривать люминесцентную лампу, как замкнутую арматуру из молочного стекла. У такой арматуры кпд определяется, как известно², следующей простой формулой:

$$\eta = \frac{p}{1-r}, \quad (1)$$

где p — коэффициент пропускания слоя, r — коэффициент отражения слоя.

При выводе формулы (1) учтены повторные отражения света от стенок. Если $p+r=1$, то η всегда равна единице, независимо от толщины слоя. Наоборот, небольшие отклонения $p+r$ от единицы уже вызывают заметное снижение кпд. Например, если p слоя равно 0,3, а $r=0,65$, т. е. $p+r=0,95$, и поглощение при однократном прохождении слоя равно 0,05, то кпд, определяемый (1), уже оказывается равным 0,86, т. е. потери света достигают 0,14. Объясняется это многократными отражениями света в такой замкнутой полости. Экспериментально установлено, что в обычных люминесцентных лампах η примерно равно 0,9.

Вопрос об оптимальных характеристиках слоя люминофора приводит к довольно любопытной задаче из области оптики рассеивающих средин²⁹.

Технология получения однородных слоёв на внутренних стенках длинных трубок основана на использовании суспензий люминофоров в различных жидкостях. После нанесения их — клеящее вещество удаляется. Имеется колоссальное число патентов, описывающих различные методы нанесения люминофоров. Здесь большую роль играют капиллярные свойства жидкой среды и адгезионная способность самого люминофора. Поэтому оказываются весьма полезными небольшие присадки поверхностно-активных веществ.

11. ВЫБОР РАЗМЕРОВ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ЛАМП

Теперь мы переходим к описанию технических образцов люминесцентных ламп. Как уже указывалось выше, до сих пор в люминесцентных лампах используется ультрафиолетовое излучение положительного столба разряда. Поэтому люминесцентные лампы имеют вид длинных трубок с большим расстоянием между электродами. При прочих равных условиях, чем больше длина лампы, тем выше её светоотдача, ибо там большая доля всей мощности расходуется в положительном столбе разряда, и тем меньшую роль играют потери у электродов (катодное и анодное падения).

На рис. 14 изображена светотдача люминесцентной лампы, как функция её длины.

Ясно, что с увеличением длины растёт мощность, потребляемая лампой. Светотдача достигает насыщения примерно при длине,

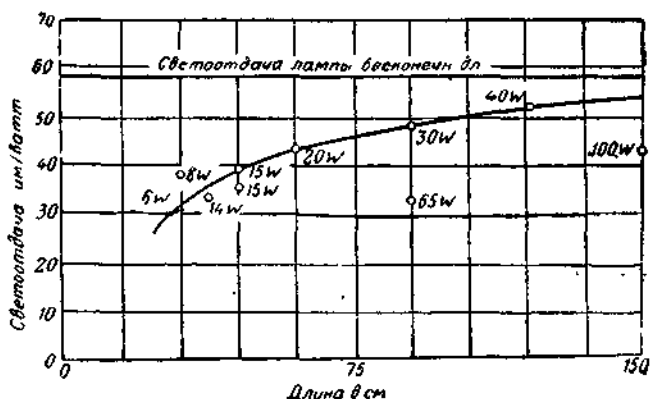


Рис. 14. Светотдача люминесцентной лампы, как функция её длины.

равной 120 см (рис. 14)⁴⁰. Диаметр лампы определяется необходимостью получить определённую температуру стенок, которой соответствует оптимальное давление ртутных паров. Эта температура зависит от мощности, потребляемой лампой, и от габаритов

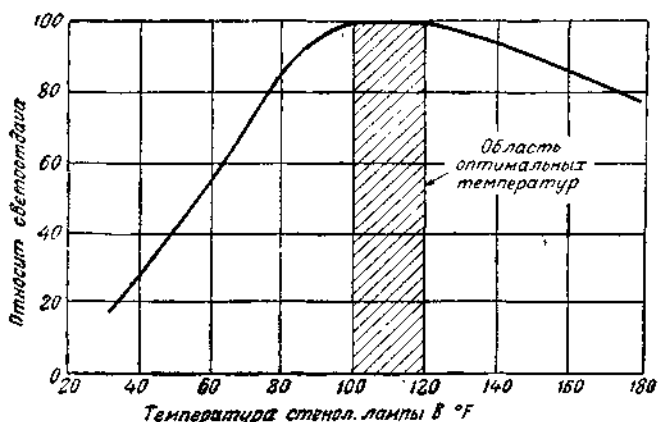


Рис. 15. Светотдача, как функция температуры стенок люминесцентной лампы.

ламп. Слишком малый диаметр лампы приводит к повышению температуры выше дозволённого предела и тем самым к снижению выхода ультрафиолетового излучения, что, в свою очередь, влечёт за собою снижение светотдачи лампы. На рис. 15 изображена

светоотдача люминесцентной лампы, как функция температуры стенок трубки⁴¹.

В табл. 5 приведены габариты низковольтных люминесцентных ламп. Мы видим, что 40-ваттная лампа представляет собой трубку более 1 м длиной и почти 4-сантиметрового диаметра. Такие боль-

Размеры люминесцентных ламп

Таблица 5

Мощность в ваттах .	6	8	14	15	15	20	30	40	65	100
Длина в сантиметрах .	22,5	30	35	45	45	60	90	120	90	150
Диаметр в сантиметрах	1,56	1,56	3,75	2,5	3,75	3,75	2,5	3,75	5,3	5,3

шие габариты люминесцентных ламп во многих случаях являются их преимуществом, но иногда приводят к затруднениям (местное освещение).

Кроме низковольтных ламп за последнее время получают всё более широкое распространение высоковольтные лампы⁴². Их длина доходит до 250 см, а диаметр от 1,5 до 2,5 см. Наконец, промелькнули в американской печати отрывочные сведения о выпуске в 1944 г. шаровых ламп.

12. ЭЛЕКТРОДЫ В ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ЛАМПАХ

Люминесцентные лампы переменного тока обладают двумя одинаковыми электродами. Каждый электрод одну половину периода тока служит катодом, а вторую половину периода — анодом. В низковольтных лампах используются электроды в виде вольфрамовых биспиралей, покрытых оксидной пастой (см. рис. 6). Оксидная паста служит для снижения работы выхода электронов. При нормальном режиме электроды накаливаются самим разрядом в результате бомбардировки («самокалящиеся».) Для того, чтобы ограничить накал электродов, американцы до войны приделывали к ним «усы» из никеля, принимавшие на себя в анодный период часть тока. Во время войны из соображений экономии никеля эти усы были упразднены⁴³. Сумма катодного и анодного падений лежит в пределах от 12 до 18 В⁴⁴. Как уже указывалось в предыдущем разделе, наличие этих падений заметно снижает светоотдачу коротких ламп. Любопытно, что оксидный катод не является в данном случае эквипотенциальным и работает одна яркая точка катода постепенно, по мере срока службы лампы, перемещающейся по катоду. Когда эта точка дойдёт от одного конца биспирали до другого, лампа перестает действовать. Очевидно, при этом дезактивируется вся

поверхность катода. В результате распыления электродов на концах трубки образуются кольцеобразные чёрные налёты *).

В высоковольтных трубках используются холодные катоды в виде цилиндров. Эти цилиндры обычно изготовлены из железа, меди или других металлов, обработанных с поверхности веществами вроде азидов бария. Сумма катодного и анодного падений достигает сотен вольт, что заставляет делать весьма длинные и узкие лампы для увеличения доли мощности, приходящейся на положительный столб разряда⁴². Срок службы холодных катодов очень большой, порядка 10 000 часов

13. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ЛАМП

Как и всякий газоразрядный прибор, люминесцентная лампа обладает довольно сложными электрическими характеристиками. Во-первых, приходится различать два режима работы лампы: режим зажигания и режим нормального горения. Во-вторых, люминесцентная лампа обладает падающей вольтамперной характеристикой, т. е. с ростом тока уменьшается падение напряжения на лампе.

Всё это чрезвычайно усложняет схему включения люминесцентной лампы (низковольтной — 120—220 В). Приведём прежде всего электрические характеристики ламп при режиме нормального горения (табл. 6). Мы видим, что падение напряжения на лампах со-

Таблица 6

Электрические характеристики низковольтных люминесцентных ламп

Ватты	6	8	14	15	15	20	30	40	45	100
Сила тока в амперах .	0,15	0,18	0,37	0,30	0,33	0,35	0,34	0,41	1,35	1,45
Падение напряжения на лампе . .	45	54	41	56	48	62	103	108	50	72
Напряже- ние сети . .	110— 125	110— 125	105— 125	110— 125	110— 125	110— 125	220— 225	220— 250	110— 125	220— 250

ставляет не более 50% от сетевого напряжения. Объясняется это тем, что потенциал зажигания газового разряда гораздо выше, чем падение напряжения на разрядном промежутке, когда разряд уже горит¹⁶. Поэтому, при меньшей разнице между сетевым напряжением и падением на горячей лампе уже нельзя получить надёжное зажигание и устойчивую работу лампы. Ведь при работе лампы на переменном токе зажигание разряда должно происходить каждые

*) Срок службы катодов примерно 3000 час. Распыление электродов ослаблено из-за присутствия аргона.

полупериода. На рис. 16 изображены осциллограммы тока и напряжения люминесцентной лампы⁴⁶.

Лампа зажигается только тогда, когда мгновенное значение сетевого напряжения достигнет определённой величины, равной потенциалу зажигания*). После этого падение напряжения на лампе

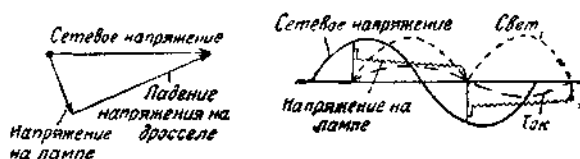


Рис. 16. Осциллограммы тока, напряжения и светового потока люминесцентной лампы. Слева изображена векторная диаграмма напряжений для цепи с люминесцентной лампой.

резко уменьшается и сохраняет в течение некоторого промежутка времени постоянную величину, почти вплоть до очередного потухания ламп. Выбор силы тока определяется желанием, с одной стороны, получить высокую экономичность, с другой стороны, необходимо-

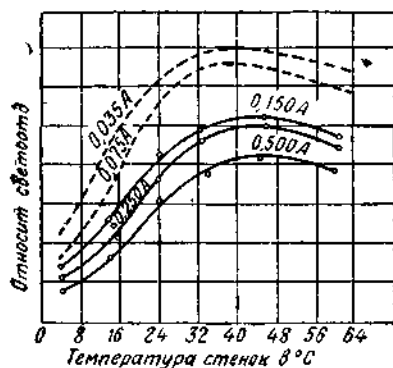


Рис. 17. Светоотдача при различных силах тока.

стью иметь лампы определённой мощности. На рис. 17 изображён ряд кривых хода светоотдачи при различных силах разрядного тока²⁸. Из этих кривых видно, что с повышением тока светоотдача уменьшается. То же следует из данных табл. 2. Мы увидим ниже, что по той же причине 65- и 100-ваттные лампы обладают пониженной светоотдачей, несмотря на свои внушительные габариты. Слишком малые токи соответствуют низким температурам стенок лампы и недостаточным значениям мощности.

Несколько иные соотношения имеют место у высоковольтных ламп. В них падение напряжения достигает 1—2 kV и при силе тока 60—100 mA уже получается мощность 15—20 W. Узкий диаметр ламп обеспечивает достаточную температуру стенок. Следует указать, что получение токов выше 100 mA при использовании холодных катодов ещё вообще является весьма трудной проблемой.

*) Зажигание люминесцентных ламп весьма облегчено из-за присутствия аргона.

14. ЗАЖИГАНИЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ЛАМП

Схема включения низковольтной люминесцентной лампы должна обеспечить надёжное зажигание лампы и затем нормальный режим её горения. Зажигание низковольтной лампы производится при помощи очень остроумного приспособления, называемого реле тлеющего разряда⁴⁶. Дело заключается в том, что для зажигания лампы необходимо сначала накаливать электроды. При холодных электродах потенциал зажигания обычной низковольтной лампы достигает почти 1000 В. Наоборот, предварительный накал электродов вызывает сильную электронную эмиссию, облегчающую зажигание разряда. Но как только произойдёт зажигание разряда, накал электродов должен быть выключен, ибо электроды уже начинают нагреваться самими разрядом. Обе эти операции — включение и вы-

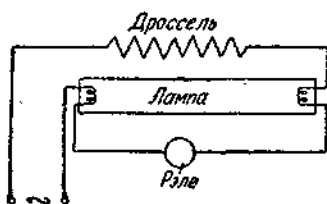


Рис. 18. Принципиальная схема включения люминесцентной лампы.



Рис. 19. Реле тлеющего разряда.

ключение накала — производит реле тлеющего разряда. На рис. 18 изображена принципиальная схема включения низковольтной люминесцентной лампы (назначение дросселя будет объяснено ниже). Таким образом, параллельно лампе включено реле тлеющего разряда. Аналогичная схема применялась в своё время для натриевых ламп, но с выключателем вместо реле. На рис. 19 изображено это реле. Реле тлеющего разряда представляет собой миниатюрную разрядную трубку, наполненную инертным газом с электродами, сделанными из биметаллических пластин. В нормальном состоянии имеется небольшой зазор между пластинами (см. рис. 19, положение *а*). При наложении достаточного напряжения между пластинами вспыхивает тлеющий разряд. Тлеющий разряд вызывает нагревание электродов, изгибающихся в результате этого нагревания навстречу друг другу вплоть до соприкосновения (см. рис. 19, положение *б*). В этом положении реле, очевидно, закорочено и так как разряд прекратился, электроды начинают охлаждаться и, следовательно, выпрямляться, отходя друг от друга. Если приложенное напряжение остаётся прежним, то опять вспыхивает тлеющий разряд, и всё начинается снова. Возникают своеобразные колебания. Потенциал зажигания реле подбирается лежащим между сетевым напряжением и потенциалом зажигания люминесцентной лампы (с накаливаемыми электродами). Поэтому в первый момент после включения разряд вспыхивает между электродами реле, но не лампы. Оба электрода лампы оказываются включёнными в сеть последовательно, но в этой цепи идёт очень маленький ток, ввиду большого внутреннего сопротивления реле.

Однако, через весьма короткий промежуток времени (доли секунды) происходит описанное выше закорачивание пластин реле. Сопротивление реле при этом падает почти до нуля, и ток, проходящий через оба электрода, резко возрастает, достигая нескольких сотен миллиамперов. Этот ток обычно превышает почти в два раза нормальный разрядный ток лампы. В результате электроды накаляются до весьма высокой температуры. Однако, и эта стадия продолжается доли секунды, ибо происходящее охлаждение электродов реле приводит к их выпрямлению и разрыву цепи. Теперь уже ситуация резко отличается от той, что была вначале. Электроды лампы благодаря тепловой инерции сохраняют свой накал, а, следовательно, обладают повышенной электронной эмиссией. Поэтому из двух параллельных разрядных промежутков — лампа и реле — лампа обладает теперь более низким потенциалом зажигания, чем реле и поэтому разряд вспыхивает в лампе, а не в реле. Если же по какой-либо причине лампа не зажглась — электроды лампы остывают и всё начинается сначала. Реле не «отстанет» от лампы, пока не произойдёт зажигание разряда в ней. Нужно сказать, что этот автоматизм работы реле, казавшийся сначала большим преимуществом, быстро стал крупным недостатком. Как только какая-либо лампа выходила из строя (дезактивировались электроды), начиналась своеобразная «сигнализация» — лампа начинала «мигать».

В больших цехах, где одновременно устанавливаются сотни и тысячи ламп, всегда может выйти из строя одна, две лампы. При таком «мигании» они резко бросаются в глаза, вызывая неприятный эффект, и кроме того, при длительной работе в режиме «мигания» сильно перегреваются дроссели. В результате длительной работы в США выпущены новые «немигающие» реле. Выпуск этих реле сопровождался шумной рекламой (они названы «революционизирующими»), но конструкция их пока не описана*). Преимущество высоковольтных ламп состоит в отсутствии специальных устройств для зажигания. Высокое напряжение обеспечивает надёжное зажигание разряда.

15. СХЕМА ВКЛЮЧЕНИЯ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ЛАМП

Переходим к режиму нормального горения лампы. Как уже указывалось, падение на лампе при этом примерно в два раза ниже напряжения сети. Значит, последовательно с лампой должно быть включено балластное сопротивление, поглощающее эту разность напряжений. Балластное сопротивление кроме того ограничивает разрядный ток лампы. Без балластного сопротивления, из-за падающей характеристики разряда¹⁶, ток в лампе начал бы сразу после зажигания катастрофически возрастать и быстро разрушил бы электроды.

*) Есть описание только «немигающего» реле старого типа (см. книгу Аминк 40).

Ясно, что делать балластное сопротивление чисто омически бессмысленно, ибо это привело бы к превращению примерно половины подводимой мощности в джоулево тепло. Поэтому, в качестве балластного сопротивления используется дроссель, представляющий небольшую катушку медной проволоки, намотанной на железный сердечник. Конкретные конструкции дросселей для люминесцентных ламп весьма разнообразны и изготавливаются десятками различных фирм. Присутствие дросселя облегчает зажигание ламп, так как благодаря его индуктивности в момент разрыва цепи реле возникает сильное перенапряжение.

Улучшение дросселей идёт по линии снижения потерь мощности и уменьшения габаритов. Потери в дросселях колеблются от 30 до 160% мощности ламп. Применение дросселей вызывает резкое ухудшение коэффициента мощности (косинуса фи) установки. У самой лампы, как это следует из осциллограмм рис. 16, коэффициент мощности равен примерно 0,95, а у лампы с дросселем только 0,55. Поэтому приходится ещё усложнять схему включения лампы, вводя ёмкость для компенсации сдвига фаз. Наибольшее распространение получили включающие устройства для 2, 3 и 4 ламп одновременно. На рис. 20 изображена схема такого устройства для двух ламп. Они более компактны и обладают меньшими потерями. В табл. 7 сведены характеристики наиболее распространённых типов включающих устройств.

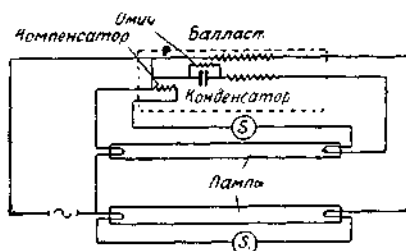


Рис. 20. Схема включения двух люминесцентных ламп. В цепи одной из ламп стоит конденсатор, создающий сдвиг фаз между лампами и улучшающий фактор мощности.

Таблица 7

Включающие устройства для люминесцентных ламп

Тип ламп	Потери в вт	Фактор мощности	Примечание
Для одной 15-ваттной . .	4,5	0,55	Дроссель
» » 15- » . .	4,5	0,90—0,95	Дроссель с конденсатором
» двух 15-ваттных . .	9,0	0,55—1,00	
» одной 20-ваттной . .	4,5	0,90—0,95	Дроссель с конденс.
» двух 20-ваттных . .	9,0	0,95—1,00	
» одной 40-ваттной . .	12	0,90—0,95	Дроссель с конденс.
» двух 40-ваттных . .	14,5	0,95—1,00	
» четырёх 40- » . .	31,0	0,95—1,00	
» одной 100-ваттной . .	35,0	0,95—1,00	
» четырёх 100-ваттных	64,0	0,95—1,00	

Интересно обратить внимание на то, что у более мощных ламп включающие устройства для двух и четырёх ламп имеют значительно меньшие потери (относительно), чем устройства для единичных ламп. Например, у 100-ваттной лампы 35 и 16 W (6434).

Наличие четырёх контактов у низковольтной люминесцентной лампы заставляет применять специальные патроны, причём для каждой лампы нужны 2 патрона. Около одного из патронов в специальном гнезде укрепляется реле тлеющего разряда. Для высоковольтных ламп также применяются специальные патроны, но более простой конструкции.

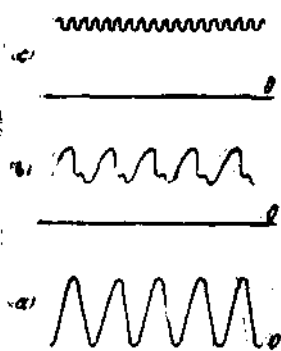


Рис. 21. Осциллограммы светового потока люминесцентных ламп.

а) одна лампа, б) две лампы со сдвигом фаз, в) три лампы на три фазы.

Включающие устройства на две и более ламп дают возможность устранить один недостаток люминесцентных ламп, так как из-за недостаточной инерционности люминофоров они создают сильные стробоскопические эффекты. На рис. 21 в одном масштабе изображены кривые изменения во времени светового потока ламп накаливания и люминесцентных. В табл. 8 приведены количественные данные для глубины модуляции светового потока за период переменного тока ⁴⁷.

В табл. 8 колебания светового потока 200-ваттной лампы накаливания условно приняты за единицу. Три люминесцентные лампы, включённые на три разные фазы трёхфазного тока, дают из-за сдвига фаз результирующую кривую с меньшими колебаниями, чем даже 40-ваттная лампа накаливания. Две лампы включены по схеме рис. 20. Одна лампа включена только с дросселем, другая с дросселем и ёмкостью, что создаёт сдвиг по фазе одной лампы по отношению к другой, и обе лампы дают вместе достаточно сглаженную кривую. При этом фактор мощности близок к единице.

Таблица 8

Колебания светового потока ламп за период переменного тока

Лампа накаливания 100	1
Три люминесцентные лампы на три фазы	3
Лампа накаливания 40	7
Две белые люминесцентные лампы	9
Две дневные люминесцентные лампы	10
Одна белая люминесцентная лампа	19
Одна дневная люминесцентная лампа	21

В некоторых специальных случаях (на железнодорожном транспорте) люминесцентные лампы применяются в цепях постоянного тока⁴⁸. Тогда, естественно, приходится вводить омическое сопротивление, роль которого обычно выполняют лампы накаливания. Ясно,

что в этих случаях экономичность установок с люминесцентными лампами оказывается сниженной. Имеются отрывочные указания на то, что в США построены люминесцентные лампы без балластного сопротивления, но нет данных об их экономичности и сроке службы.

16. СВЕТОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ЛАМП

Рассмотрим подробнее световые характеристики люминесцентных ламп. На рис. 22 в виде подробной диаграммы представлен весь баланс энергии 40-ваттной люминесцентной лампы. Из этой диаграммы следует, что в люминесцентной лампе 18,5% подводимой мощности превращается в видимый свет, т. е. энергетический кпд люминесцентной лампы примерно в полтора раза выше, чем у 100-ваттной лампы накаливания (см. табл. 1). Однако, это увеличе-

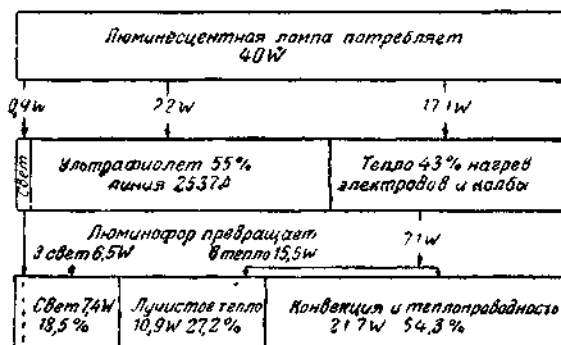


Рис. 22. Баланс энергии 40-ваттной люминесцентной лампы.

ние энергетического кпд не является единственной и, пожалуй, даже не главной причиной высокой экономичности люминесцентных ламп. В табл. 9 приведены световые характеристики люминесцентных ламп, со всей отчётливостью подтверждающие это обстоятельство.

Мы видим, что световая отдача белых 40-ваттных ламп достигает 52,5 лм/вт, что в 3,4 раза превышает световую отдачу 100-ваттной лампы накаливания (15,5 лм/вт). Световая отдача зелёных ламп достигает 75 лм/вт. Эти цифры показывают, какое огромное значение имеет распределение энергии уже в пределах видимого спектра. Основной причиной высокого светового кпд белых люминесцентных ламп является выгодное распределение энергии в видимой части их спектра. На рис. 23, 24 и 25 изображены спектральные

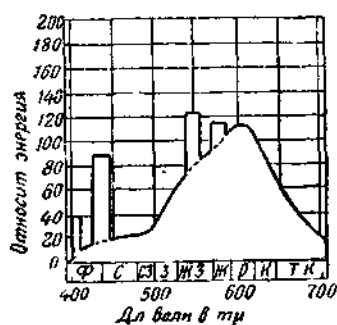


Рис. 23. Распределение энергии в спектре белой лампы. Площадь прямоугольников изображает в соответствующем масштабе энергию линий ртутного спектра.

кривые белой, дневной и мягко-белой люминесцентных ламп. Для получения таких спектральных кривых приходится применять смеси

Таблица 9

Светоотдача люминесцентных ламп

186

В. А. ФАБРИКАНТ

Мощность в <i>вт</i> Цвет лампы	6		8		14		15		20		30		40		65		100	
	Световой поток в <i>лм</i>	Светоотдача в <i>лм/вт</i>	Световой поток в <i>лм</i>	Светоотдача в <i>лм/вт</i>	Световой поток в <i>лм</i>	Светоотдача в <i>лм/вт</i>	Световой поток в <i>лм</i>	Светоотдача в <i>лм/вт</i>	Световой поток в <i>лм</i>	Светоотдача в <i>лм/вт</i>	Световой поток в <i>лм</i>	Светоотдача в <i>лм/вт</i>	Световой поток в <i>лм</i>	Светоотдача в <i>лм/вт</i>	Световой поток в <i>лм</i>	Светоотдача в <i>лм/вт</i>	Световой поток в <i>лм</i>	Светоотдача в <i>лм/вт</i>
Белый	180	30	300	37,5	450	33	615	41	900	45	1450	49	2100	52,5	2100	32	4200	42
Дневной	155	26	250	31	370	26,5	495	33	730	36,5	1200	40	1700	42,5	1800	27	3350	33,5
Мягко-белый	—	—	—	—	325	23	435	29	640	32	1050	35	1500	37	—	—	—	—
Синий	—	—	—	—	—	—	315	21	460	23	780	26	—	—	—	—	—	—
Зелёный	—	—	—	—	—	—	900	60	1300	65	2250	75	—	—	—	—	—	—
Розовый	—	—	—	—	—	—	300	20	440	22	750	25	—	—	—	—	—	—
Золотистый	—	—	—	—	—	—	375	25	540	27	930	31	—	—	—	—	—	—
Красный	—	—	—	—	—	—	45	3	60	3	120	4	—	—	—	—	—	—

люминофоров, описанных в разделе 9. Например, в белой лампе используется в качестве основного люминофора цинк-бериллий силикат и к нему добавлены небольшие количества бората-кадмия и вольфрамата магния⁴⁷. В дневной лампе процент люминофоров с голубым свечением значительно выше, чем в белых лампах. К сожалению, для смесей люминофоров не выполняются обычные законы смешения⁸⁹, поэтому подбор смесей ведётся чисто эмпирически.

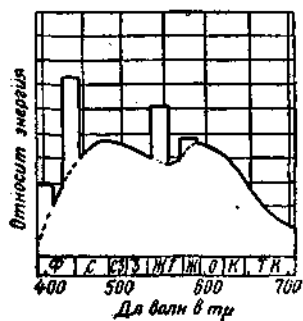


Рис. 24. Распределение энергии в спектре дневной лампы.

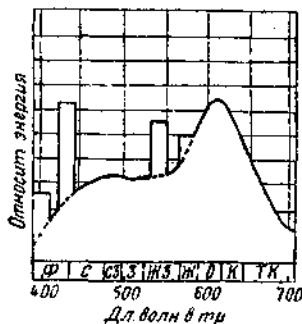


Рис. 25. Распределение энергии в спектре мягко-белой лампы.

Ф. Бугаева²⁶ подсчитала средние коэффициенты видности для спектральных кривых белой и дневной ламп. Оказалось, что для белой лампы этот коэффициент равен 0,50, а для дневной 0,44, световой кпд излучения 310 и 245 лм/вт. Для 100-ваттной лампы накаливания тот же коэффициент равен всего лишь 0,21. Объясняется это тем, что у белых и дневных люминесцентных ламп гораздо большая доля энергии сосредоточена в центральной части видимого спектра, соответствующей максимуму чувствительности человеческого глаза. Различие в светоотдачах белой и дневной ламп объясняется спектральными характеристиками. Мягко-белые лампы, дающие более приятный свет, обладают значительно меньшей светоотдачей, как раз благодаря тому, что у них искусственно снижена центральная часть спектральной кривой. Наоборот, колоссальная светоотдача зелёной лампы частично объясняется тем, что всё излучение этой лампы (содержащей ZnSiO_3) сосредоточено в узкой области, близкой к максимуму чувствительности глаза.

Выбор форм спектральных кривых для люминесцентных ламп определялся колориметрическими соображениями. Лампа дневного света подгонялась к источнику С (см. раздел 2). Лампа белого света примерно соответствует цветовой температуре 3500°K.

На рис. 26 изображены на равноконтрастном графике цвета тест-объектов при освещении люминесцентными лампами ГЕС и ВЭИ. Точки C_1 , C_2 и т. д. соответствуют цветам тест-объектов при освещении эталонным источником C_5 .

В табл. 10 x и y — цветовые координаты, ρ — коэффициент отражения тест-объектов. Наиболее важными являются величины ΔS ,

дающие в числе порогов изменённые цвета тест-объекта. Мы видим, что ΔS , т. е. искажения цветопередачи при освещении люминесцентными лампами дневного света, не превышают одного-двух порогов. Коэффициенты отражения почти не изменяются. Таким образом, люминесцентные лампы дневного света практически совпадают по своим колориметрическим характеристикам с источником S и дают действительно настоящий дневной свет, а белые люминесцентные лампы дают свет, несравненно более белый, чем лампы накаливания.

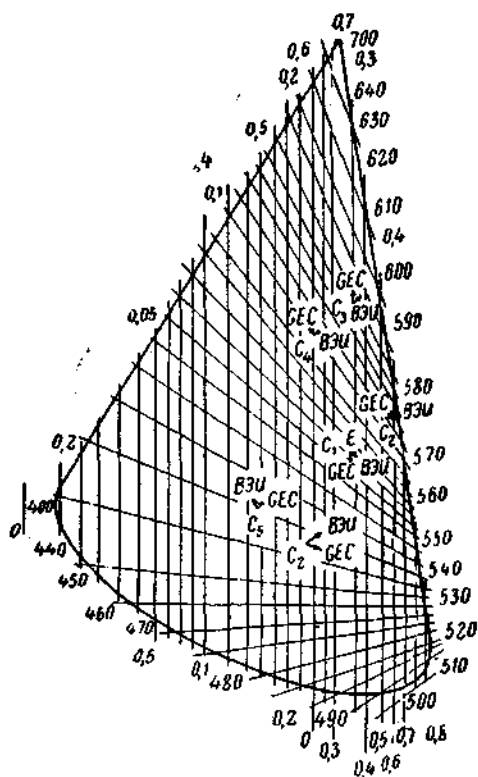


Рис. 26. Цветопередача при освещении люминесцентными лампами дневного света.

17. ПРИМЕНЕНИЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ЛАМП

При практическом применении экономичность установок характеризуется цифрами более низкими, чем приведённые в табл. 9.

Таблица 10

Колориметрические характеристики люминесцентных ламп дневного света

Тест-объекты		Источник S			Лампа GEC				Лампа ВЭИ № 5-6			
№	Цвет	x_0	y_0	ρ_0	x	y	ΔS	ρ	x	y	ΔS	ρ
1	Белый . .	0,310	0,316	1,0	0,311	0,327	0,3	1,0	0,316	0,336	0,9	1,0
2	Жёлтый . .	0,458	0,461	0,58	0,460	0,449	0,7	0,62	0,476	0,488	0,7	0,61
7	Красный . .	0,546	0,320	0,14	0,555	0,323	0,7	0,15	0,552	0,324	0,6	0,14
9	Малиновый	0,382	0,208	0,14	0,378	0,195	1,0	0,15	0,391	0,214	0,6	0,14
13	Синий . .	0,200	0,144	0,12	0,206	0,150	0,7	0,11	0,206	0,141	0,7	0,11
15	Голубой . .	0,188	0,221	0,20	0,188	0,262	2,1	0,19	0,200	0,254	1,8	0,19
22	Зелёный . .	0,201	0,514	0,21	0,222	0,485	1,3	0,21	0,234	0,508	1,7	0,21

Объясняется это тем, что необходимо учесть потери во включающем устройстве и определять светототдачу, как отношение светового потока ко всей мощности, потребляемой установкой. Тогда мы получим данные, сведённые в табл. 11.

Таблица 11

Светототдача установок с люминесцентными лампами в $лм/вт$

Мощность в $вт$	15	20	40	100
Цвет				
Белый	32	37	44	36
Дневной	25	29	36	29
Мягко-белый . .	22	26	31	—

Таким образом, несмотря на указанную поправку, светототдача установки с 40-ваттными белыми люминесцентными лампами достигает 44 $лм/вт$, т. е. почти в три раза превышает светототдачу 100-ваттных ламп накаливания. Разница настолько велика, что становится понятным, какой грозный конкурент появился у лампы накаливания. Нужно сказать, что кроме высокой экономичности и цветности люминесцентные лампы обладают ещё рядом серьёзных преимуществ по сравнению с лампой накаливания. Для целей общего освещения больших помещений (цехов заводов, общественных зданий) положительным качеством люминесцентных ламп является их низкая поверхностная яркость. Вместо сотен стильбов у нити лампы накаливания люминесцентная лампа имеет яркость от 0,15 до 0,75 стильба. Поэтому люминесцентные лампы не оказывают слепящего действия на глаза и могут применяться в открытых крытообразных арматурах⁴⁹. В США широко распространены осветительные установки с люминесцентными лампами. Обычно из ламп

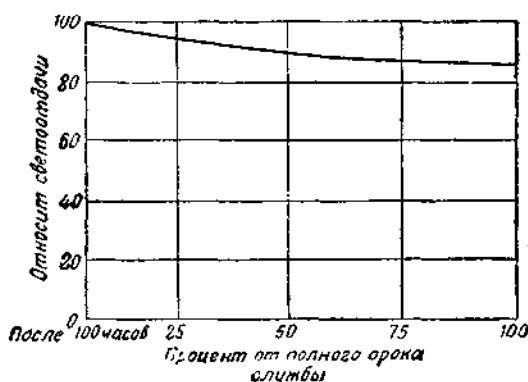


Рис. 27. Спад светототдачи в течение срока службы лампы.

образуют сплошные светящиеся линии, создающие равномерное рассеянное освещение⁵⁰.

Далее, серьёзным преимуществом люминесцентных ламп является их большой срок службы — 2500—3000 часов для низковольтных ламп и 10000 часов для высоковольтных.

Между прочим, данные о светототдаче ламп в табл. 9 приведены после первых 100 часов горения. За эти 100 часов светототдача падает довольно сильно — на 10%, в дальнейшем светототдача снижается весьма медленно. На рис. 27 изображена

кривая спада светотдачи со временем службы люминесцентной лампы⁵¹.

Иногда возникает вопрос, не вызывает ли применение люминесцентных ламп повышения расхода таких дефицитных материалов, как медь и другие металлы. В США во время войны этот вопрос встал особенно остро. На первый взгляд кажется, что необходимость применения включающих устройств безусловно должна привести к большему расходу меди, чем в случае ламп накаливания. Однако, расчёт, произведённый Кэверли⁵², показал, что это не так. В табл. 12 приведены результаты этого любопытного расчёта. Из

Таблица 12

Расход меди и стали при освещении люминесцентными лампами и лампами накаливания

Тип установки	Генератор — распредел. сеть		Установка		Полный расход	
	Медь (кг)	Сталь (кг)	Медь (кг)	Сталь (кг)	Медь (кг)	Сталь (кг)
Лампа накаливания (2,5 500 W) в рассеивающей арматуре . . .	65	465	0	14	65	479
Люминесцентная лампа	26	184	4	25	51	209
Полная экономия	—	—	—	—	14	270

табл. 12 прежде всего видно, что наибольшие количества меди и стали расходуются на самой электростанции в генераторах и в распределяющих электроэнергию сетях. Поэтому снижение расхода электроэнергии (при той же освещённости) приводит к такой большой экономии этих материалов (за счёт уменьшения мощности генераторов и уменьшения сечения проводов), что эта экономия с избытком перекрывает возрастание расходов материалов на саму осветительную установку. В результате, как это ни парадоксально, получается даже некоторая общая экономия меди и стали. Мы не можем здесь останавливаться на вопросах стоимости освещения люминесцентными лампами, но они, несмотря на их относительно высокую стоимость, быстро окупаются и потом дают экономию⁵³. В заключение настоящего раздела, приведём некоторые статистические данные о распространённости отдельных типов люминесцентных ламп.

По спектральному составу наибольшее распространение имеют белые лампы (65%), 30% всех установленных ламп составляют дневные, остальные цвета — 5%⁵⁴. Объясняется такое соотношение более высокой экономичностью белых ламп и их более приятными цветовыми свойствами. Лампы дневного света, главным образом, применяются там, где важна точная цветопередача. Мягко-белые

лампы дают очень приятный свет, но их широкое применение ограничено сравнительно низкой светоотдачей.

Имеются также характерные данные о потреблении люминесцентных ламп различных мощностей. Естественно, что наиболее распространёнными являются 40-ваттные лампы, составляющие примерно 70%, затем идут 20-ваттные — 20%, остальные типы — 10%.

18. ПУТИ ДАЛЬНЕЙШЕГО УЛУЧШЕНИЯ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ЛАМП

Несмотря на свои огромные преимущества по сравнению с лампами накаливания, люминесцентные лампы, конечно, не лишены некоторых недостатков. Кроме того, сами преимущества люминес-

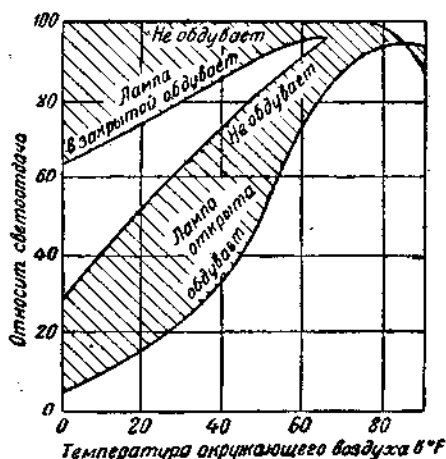


Рис. 28. Светоотдача люминесцирующей лампы в зависимости от температуры окружающего воздуха. Обдувание вызывает снижение температуры стенок. Наоборот, заключение лампы в герметичную арматуру повышает температуру стенок.

центных ламп могут быть значительно усилены при их дальнейшем усовершенствовании.

Можно без особого преувеличения сказать, что люминесцентная лампа образца 1943 г. так относится к люминесцентной лампе будущего, как угольная лампа к биспиральной газополой лампе накаливания. Ведь мы присутствуем при самой первой стадии развития люминесцентных ламп. Поэтому особенно важно представить себе, хотя бы в общей форме, те принципиальные пути, идя по которым можно будет достигнуть значительного улучшения характеристик люминесцентных ламп. Естественно, что многое в этой области ещё неясно и весьма дискуссионно. Основной недостаток обычных люминесцентных ламп — это чувствительность к внешней температуре. На рис. 28 изображена светоотдача лампы в зависимости от

внешней температуры. Такая зависимость вполне естественна, так как внешняя температура сильно влияет на температуру стенок лампы. Оптимальная внешняя температура соответствует 25° С.

При снижении внешней температуры на 1° С световой поток лампы снижается примерно на 1,5%. При температурах ниже 0° С вымораживается ртуть, и лампы плохо зажигаются. Делались попытки приспособить обычные люминесцентные лампы для работ при низких температурах путём понижения давления аргона⁴⁷. Однако, эти попытки приводят к заметному снижению светотдачи и срока службы. Для построения люминесцентных ламп, работающих при любых температурах, целесообразно было бы отказаться от использования ртути. Лампы, наполненные только инертным газом, обладали бы нужными температурными свойствами, но эксперименты, проведённые с инертными газами целым рядом исследователей (Дженкинс Фонда и др.⁵⁶), пока дали весьма неутешительные результаты в смысле светотдачи. Основной причиной, ограничивающей светотдачу люминесцентных ламп, считают невыгодное соотношение между длиной волны возбуждающего излучения и длинами волн люминесценции. Как известно, резонансное излучение инертных газов лежит в пределах от 584 Å для гелия до 1469 Å для ксенона.

Если считать, что в лучшем случае на каждый квант возбуждающего излучения получается один квант излучения люминесценции, то энергетический выход люминесценции при возбуждении шумановской областью должен лежать в пределах примерно от 0,10 до 0,30 (считая среднюю длину волны люминесценции равной 5000—6000 Å). Справедливость квантового закона выхода люминесценции, впервые высказанного и установленного С. И. Вавиловым, была проверена экспериментально для целого ряда жидких и твёрдых люминофоров⁵⁶.

Невозможность «размена» одного «крупного» коротковолнового кванта на два и более «мелких» квантов сильно снижает принципиальный предел для светотдачи даже обычных люминесцентных ламп, использующих ртутные линии 1850 и 2537 Å. В них энергетический выход люминесценции не может, согласно этому закону, заметно превышать примерно 0,5. Тэйер и Бернс²⁸ произвели соответствующие подсчёты и измерения для 1,5-ваттных ламп 2,5 см диаметра, покрытых различными люминофорами. Максимальная возможная светотдача E_M подсчитывалась следующим образом:

$$E_M = 621CR \times 0,45 \times 0,90 = 251CR \text{ лм/вт}, \quad (2)$$

где 621 — число люменов на ватты лучистой энергии для 5560 Å, C — коэффициент видности излучения люминесценции, определяемый из спектральной кривой, R — квантовое отношение — усреднён-

ное отношение энергии кванта люминесценции к энергии возбуждающего кванта, 0,45 — доля мощности лампы, превращаемая в линию 2537, 0,90 — η — КПД рассеивающего слоя лампы (см. раздел 10).

В табл. 13 приведены результаты расчётов и измерений Тэйера и Бериса. Они почему-то не выполнили тех же подсчётов для практически интересных случаев белой и дневной ламп. Такие расчёты по формуле (2) были сделаны Ф. Бутаевой²⁶ и дали следующие результаты: для белой лампы 50 лм/вт, для дневной лампы 55 лм/вт.

Однако, эксперименты Ф. Бутаевой²⁹ с фильтром, отрезающим линию 1850 Å, проведённые уже внутри люминесцентной лампы

Таблица 13

Определение квантового выхода для люминофоров путём сравнения расчётов и измерений 15-ваттных ламп

Люминофор	Коэффициент видности C	Квантовое отношение R	Вычисленная светоотдача E_M	Наилучшая измеренная светоотдача *)	Квантовый выход	Энергетический выход
CaWO_4	0,21	0,58	30	21	0,70	0,41
MgWO_4	0,37	0,53	50	35	0,70	0,37
ZnSiO_3	0,78	0,48	95	70	0,74	0,36
$(\text{Zn, Be})\text{SiO}_3$	0,55	0,43	60	32	0,53	0,23
CdSiO_3	0,53	0,42	55	30	0,55	0,24
CdB_2O_5	0,34	0,41	35	23	0,66	0,27

(люминофором было покрыто маленькое пятнышко на стенке, которое закрывалось фильтром, см. раздел 9), показали, что кроме линии 2537 Å в возбуждении люминофоров примерно в равной мере участвует линия 1850 Å. Отсюда следует, что формула (2) для расчёта E_M неверна и приведённые в табл. 13 значения предельных светоотдач значительно преуменьшены. Значения квантового выхода, наоборот, завышены примерно в два раза, так как при расчётах учитывалась только линия 2537 Å, а измерялась по существу суммарная яркость люминофора, вызванная обеими линиями 2537 и 1850 Å. К сожалению, пока неизвестна интенсивность линии 1850 Å, нельзя точно рассчитать принципиальный предел светоотдач для люминесцентных ламп с ртутными парами.

*) При измерениях исключалось излучение самого разряда, дающего 4 лм/вт.

Во всяком случае, согласно закону квантового выхода эта светотдача не может превышать $621 C \times R$, т. е. для белых ламп 128 лм/вт, а для дневных 134 лм/вт.

Такие светотдачи получились бы при 100%-ном превращении мощности в линию 2537 Å и при квантовом выходе люминесценции, равном единице. Эти светотдачи весьма высоки, но всё же значительно меньше 220 лм/вт для идеального источника света (см. раздел 3).

Напомним, что при этом средний коэффициент видности у белых ламп почти в полтора раза выше, чем у «идеального источника» (см. раздел 3), благодаря заметным отклонениям спектральной кривой белой лампы от спектральной кривой температурного излучателя.

Возникает невольно вопрос, не могут ли быть отклонения от закона «квант на квант», т. е. не может ли наблюдаться «размен» крупных квантов на несколько мелких. При оптическом возбуждении люминесценции паров натрия такой «размен» квантов, как известно, наблюдается⁶⁰. При возбуждении линии в 3302,34—94 пары натрия испускают три линии 22057—84, 11388—11404 и 5889,96 и 5895,93. При возбуждении атомы натрия поднимаются на уровень $4^2P_{3/2, 1/2}$, переходя с этого уровня на уровень $4^2S_{1/2}$, испуская линию 22057—22084, затем с $4^2S_{1/2}$ на $3^2P_{1/2, 3/2}$, испуская линию 11382—11404 и, наконец, с уровня $3^2P_{1/2, 3/2}$ на уровень $3^2S_{1/2}$, испуская линию 5889,96—5895,93 (рис. 29).

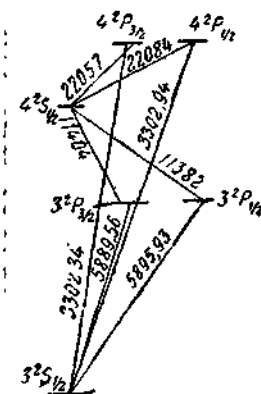


Рис. 29. Схема «размена» квантов при флуоресценции паров натрия.

Возможно, что будут созданы люминофоры (особенно с участием редких земель), обладающие аналогичными свойствами. Это сразу резко подымет принципиальную границу светотдачи люминесцентных ламп и сделает реальным создание безртутных люминесцентных ламп с большой светотдачей.

Наконец, необходимо упрощение схемы включения ламп. Несмотря на всё остроумие принципа действия реле, сложность схемы включения безусловно является недостатком люминесцентных ламп. Здесь перспективным является развитие лампы с холодными электродами. Как будто бы есть надежды на создание электродов с большой холодной эмиссией электронов⁶¹).

⁶¹ В американских журналах появились сообщения о новом включающем устройстве, разработанном в трансформаторной лаборатории ДЖИИ. Новое устройство зажигает лампы без реле, но при этом лампы старого типа быстро выходят из строя. С 1 мая 1944 г. начат массовый выпуск 40-ваттных ламп нового типа с нормальным сроком службы при работе с новым включающим устройством.

ДОПОЛНЕНИЕ 1. УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ЛАМПЫ

Во время войны были выпущены совершенно своеобразные люминесцентные лампы, дающие, главным образом, невидимые ультрафиолетовые лучи. Сначала ультрафиолетовые люминесцентные лампы изготовлялись в виде длинных узких трубочек на переменный ток напряжением 120 В, затем эти лампы приняли вид колб, вроде изображённой на рис. 30, и рассчитаны на питание постоянным током с напряжением 24—26 В⁶¹. Кроме конструкции претерпел также изменение и люминофор, нанесённый на стенке лампы. В старом типе, очевидно, использовался вольфрамат-кальция, тогда как в новых лампах применён специальный люминофор 360 В, обладающий максимумом излучения на длине волны 3650 Å (рис. 31). Ультрафиолетовые лампы применяются с чёрным фильтром Вуда, хорошо пропускающим длинноволновой ультрафиолет в районе 3650 Å и полностью поглощающим видимое излучение. Сочетание ультрафиолетового люминофора с фильтром Вуда даёт возможность создать прекрасный источник излучения для возбуждения лю-

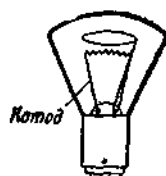


Рис. 30. Ультрафиолетовая люминесцентная лампа постоянного тока 24 В.

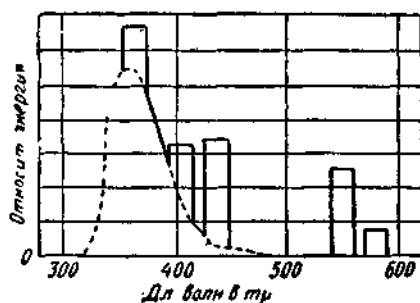


Рис. 31. Распределение энергии в спектре ультрафиолетовой люминесцентной лампы.

минофоров, нанесённых на шкалы приборов самолёта. При этом отсутствуют всякие блики от приборных стекол, так как возбуждающая лампа практически не даёт видимого света. При использовании ультрафиолетовых люминесцентных ламп уже имеют место две последовательные трансформации излучения. Сначала в самой лампе коротковолновой ультрафиолет разряда превращается люминофором 360 В в длинноволновой ультрафиолет, а затем этот ультрафиолет, попадая на люминесцирующие надписи, превращается в видимое излучение. Как показывают измерения, несмотря на такую двойную трансформацию, применение люминесцентных ультрафиолетовых ламп весьма эффективно.

ДОПОЛНЕНИЕ 2.

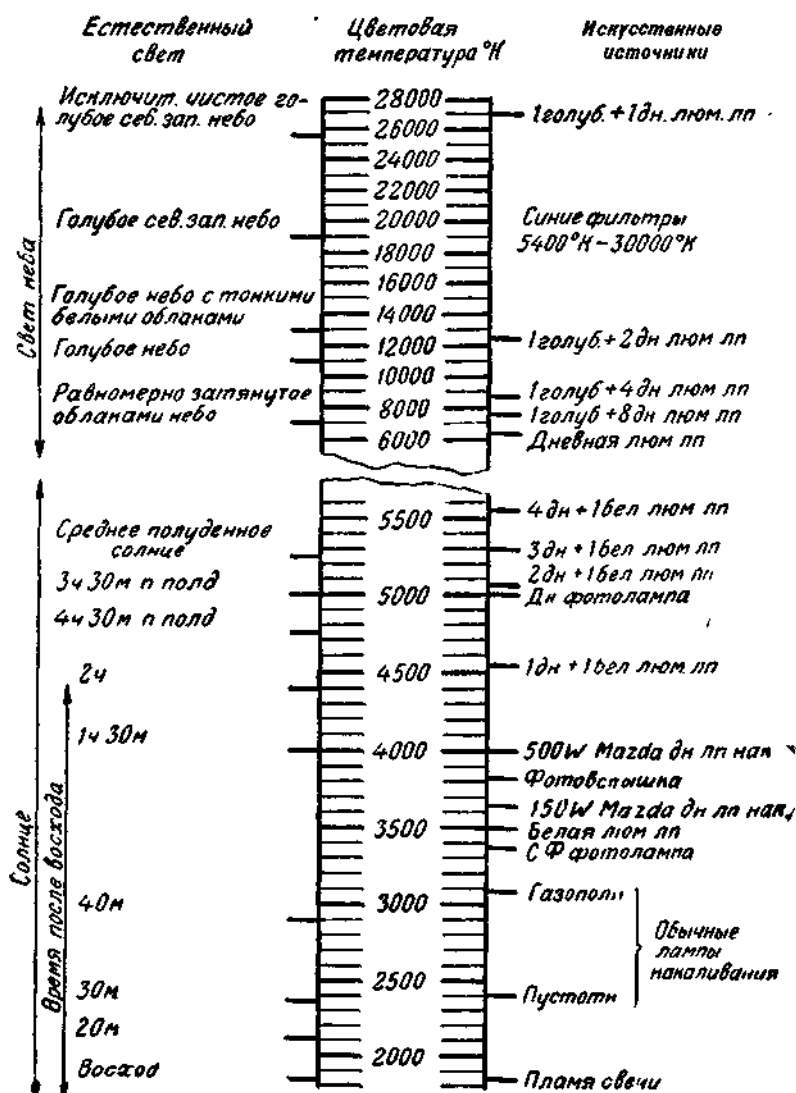


Рис. 32 (дополнение 2).

ЛИТЕРАТУРА

1. S. Hibben, J. E. S. Trans., **34**, 855, 1939.
2. Б. Ф. Федоров, Общий курс светотехники, 2 изд., М.—Л., 1944.
3. L. Ickis, H. Haunes, G. E. R., **42**, 145, 1939; Metropolitan Vickers Gazette, **20**, 342, 1943.
4. Н. Т. Федоров, Общее цветоведение, М., 1939.
5. D. Nickerson, J. E. S., Trans., **34**, 1233, 1939. Е. С. Ратнер и Д. А. Шкловер, Бюлл. ВЭИ, **5**, 35, 1941. A. Taylor, III. Eng., **35**, 625, 1940.
6. D. Indd, JOSA, **22**, 65, 1932.
7. А. П. Иванов, Электрические источники света, ч. 1, М.—Л., 1938.
8. F. Mohler, JOSA, **29**, 152, 1939.
9. T. Kollian, JOSA, **28**, 49, 1938.
10. A. Becquerel, Ann. de phys. et chim., **55**, 93, 1859; La Lumière, Paris, 1867.
11. Р. Вуд, Физическая оптика, М.—Л., 1936.
12. G. Claude, C. R., Paris, **203**, 1203, 1936, **207**, 1206, 1938.
13. J. Randall, Journ. Roy. Soc. Arts, **135**, 4393, 1937.
14. Электронные и ионные приборы, ГЭИ, М.—Л., 1940, стр. 217.
15. W. Elenbaas, Physica I, **211**, 678, 1934; **2**, 45, 1935; De Ingenieur, **50**, 83, 1935.
16. Д. А. Рожанский, Физика газового разряда, М.—Л., 1937.
17. M. Druyvesteyn, F. Penning, Rev. Mod. Phys., **12**, 1940.
18. W. Penney, Phys. Rev., **39**, 467, 1932.
19. F. Arnot, G. Baines, Proc. Roy. Soc., **151**, 256, 1935; P. Bricout, Journ. d. Phys., **9**, 88, 1928.
20. В. Фабрикант, И. Пир, ДАН, **16**, 279, 1937.
21. К. И. Паневкий, ЖЭТФ, **9**, 1007, 1939.
22. M. Druyvesteyn, N. Warmoltz, Phil. Mag., **17**, 1, 1934.
23. В. Фабрикант, ДАН, **15**, 451, 1937.
24. В. Фабрикант, ЖЭТФ, **8**, 549, 1938; M. Townsend, Tr. AJEE, **61**, 607, 1942.
25. C. Found, E. Neunelly, Доклад на 34-м годовом собрании Амер. об-ва инжен. светотехн., 1940.
26. Ф. Бугаева, ДАН, **27**, 654, 1940.
27. J. Marden, N. Beese, G. Meister, JOSA, **30**, 184, 1940.
28. R. Thayer, B. Barnes, JOSA, **29**, 131, 1939.
29. Ф. Бугаева и В. Фабрикант, Изв. АН СССР, сер. физич., 1944.
30. A. Oday, R. Cissel, J. E. S. Trans., **34**, 1165, 1939.
31. N. Beese, JOSA, **29**, 278, 1939; J. Marden, N. Beese, III. Eng., **36**, 235, 1941.
32. Ф. Бугаева, Техн. отчет ВЭИ, 1944; ЖТФ, 1945 (готов. для печати).
33. J. Marden, G. Meister, J. E. S. Trans., **34**, 503, 1939.
34. В. И. Долгополов, Бюлл. ВЭИ, № 5, 29, 1941.
35. Kröger, Диссертация 1940 (Голланд.).
36. G. Fonda, J. Phys. Chem., **43**, 564, 1939.
37. Ф. Зейтц, Р. Джонсон, Успехи физич. наук, **29**, 89, 1940. N. Mott, R. Gurney, Electronic Process in ionic crystals, Oxford, 1940. H. Leverenz, Pr. J. R. E., **32**, 256, 1933. В. Левшин, В. Антонов-Романовский и Д. Блохинцев, Изв. АН СССР, сер. физич., 1944 (в печати).
38. J. Marden, G. Meister, III. Eng., **36**, 1286, 1941.
39. Ф. Бугаева, В. Долгополов и В. Фабрикант, Изв. АН СССР, сер. физич., 1944 (в печати).
40. C. Amick, Fluorescent Lighting Manual, Mc. Graw Hill, N. Y., 1942.
41. E. Beggs, Lighting a. Lamps, **42**, N. 5, 18, 1942.
42. K. Chanpon, K. Barr, III. Eng., **37**, 769, 1942; W. Phillips, Electrical

- Wordl, Apr., 17, 62 1943; A. Ban, C. Cutler, Electrical Wordl, May, 1, 38, 1943; J. Sabatini, Ill. Eng., 38, 171, 1943.
43. D. Caverly, Ill. Eng., 38, 133, 1943.
 44. J. Marden, G. Meister, J. E. S. Trans., 34, 1095, 1939.
 45. R. F. Hays, D. Gustin, J. E. S. Trans., 35, 939, 1940.
 46. R. Hays, Electronics, 13, 14, 1940; El. Eng., 60, 226, 1941.
 47. E. Beggs, Lighting a. Lamps, 42, N. 4, 14, 1942; R. Neumann, Electronic Engineering, 16, 202, 1943.
 48. Railway, Electr. Eng., 31, 135, 1940.
 49. W. Potter, W. Darley, Ill. Eng., 35, 759, 1940; F. Winkler, Ill. Eng., 37, 220, 1942; D. Severance, ibid., 38, 49, 1941; R. Daglas, D. Adams, Ill. Eng., 38, 141, 1943.
 50. G. Taylor, Ill. Eng., 36, 1414, 1941; W. Brown, Mag. Light, 5, 20, 1941; K. Frank, Ill. Eng., 37, 217, 1942; M. Luckiesh, F. Moss, Ill. Eng., 37, 81, 1942 (общие сведения); R. Ackerley, Electr. Eng., 63, 203, 1943 (английск.); E. Cleaver, India Rubber World, 102, 33, 1940 (резина); R. Hays, El. Eng., 60, 539, 1941; Ill. Eng., 36, 570, 1941 (самолеты); I. Long, Rayon, Textill Monthly, 22, 179, 1941; G. Taylor, Cotton, 105, 105, 1941; D. Caverly, Ill. Eng., 36, 489, 1939 (текстиль); E. Derrah, G. E. R., 46, 593, 1943; Steel, 106, 42, 1940; Lighting Rev. Dec., 19, 1942 (авиаприборы); R. Blain, Telephony, 120, 9, 1941; B. Durden, Telephon Eng., 45, 23, 1941 (телеф. станции); El. World, 120, 77, 1943 (метро); Power, Plant Eng., 42, 67, 1942 (ж. д.), Architect. Record, Apr., 69, 1943 (безоконый артл. завод); Mag. Light, 1, 13, 1943 (подземные заводы); El. Times 102; 30, 1942 (картинные галлерен).
 51. C. Amick, loc. cit.
 52. D. Caverly, Ill. Eng., 38, 133, 1943.
 53. B. Greenberg, Ill. Eng., 37, 165, 1942; Lighting a. Lamps, 41, 19, 1943.
 54. P. S. Miller, Electrical Eng., 63, 126, 1944.
 55. G. Fonda, H. Huthsteiner, JOSA, 32, 156, 1942.
 56. S. I. Vavilov, ZS. Physik, 42, 311, 1927; В. Фабрикант, Sow. Phys., 3, 567, 1933; G. Harrison, P. Leighston, Phys. Rev., 38, 5, 1932; Соломкин, ДАН, 1941.
 57. C. Christensen, G. Rollefson, Phys. Rev., 34, 1157, 1929.
 58. Ill. Eng., 39, 235, 1944; Lighting a. Lamps, Apr. 1944.
 59. E. Beggs, JOSA, 33, 61, 61, 1943; G. E. R. Jan., 1942.

Обзоры

1. С. И. Вавилов, Изв. АН СССР, сер. физич. 1941.
2. А. Морин, Амер. Техн. и Пром., 19, № 1—2, 31, 1942.
3. П. И. Черноусов, Электричество, 1944.
4. C. Amick, Fluorescent Lighting Manual, Mc Graw Hill, N. Y., 1942.
5. P. S. Miller, Electrical Engineer, 63, 126, 1944.
6. L. Davis, H. Ruff a. W. Scott, J. J. E. E. (London) 89, 447, 1942, (англ. люмин. лампы).
7. R. Neumann, Electronic Engineering, 16, 154, 202, 1943 (историч. очерк).