

НОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ВОЗБУЖДЕНИЮ СВЕТА *

М. Пиранни Берлин

ПРОБЛЕМА ВОЗБУЖДЕНИЯ СВЕТА

В течение долгого времени задача светотехники заключалась в воспроизведении солнечного света при помощи температурного излучения. Отсутствие веществ с достаточно высокой точкой плавления, малой летучестью, делают эту задачу невыполнимой. Несмотря на существующие небольшие селективные отклонения все температурные излучатели излучают по законам, близким к законам черного тела. Стало быть максимальный достижимый коэффициент полезного действия не может быть существенно выше подчитанного для черного тела, т. е. в лучшем случае около 15%¹.

Для того чтобы сделать принципиально возможным дальнейший прогресс в этой области необходимо было перейти к изучению элементарных процессов свечения. Общая проблема светотехники, получение света, близкого к солнечному, расчленяется тогда на проблемы: 1) нахождение способа экономичного получения излучения в видимой части спектра (проблема количества) и 2) нахождение способа составления излучения желаемого действия (проблема качества).

Использование резонансной линии для светового излучения

Основным путем для исследования первого вопроса является возбуждение отдельного атома электронным ударом. Атом натрия является примером простого атома, излучение которого, в основном, лежит в видимой части спектра. Видимое излучение натрия на 99% приходится на длину волны $\lambda = 5890/96 \text{ \AA}$, где чувствительность глаза составляет 0,78 от максимальной (распределение энергии Na см. табл. 1). **

* Доклад, сделанный автором, в VI секции Международного электротехнического конгресса в Париже в 1932 г. Перевод Д. Лившиц.

** Здесь получается одновременно интересный побочный результат: можно очень просто получить механический эквивалент света путем сравнения с приемником, градуированным прямо по лучистой энергии, причем кривую чувствительности глаза для различных длин волн можно считать известной. Ср. H. Krefft и M. Pirani, Z. tech. Physik 13, 367, 1932.

ТАБЛИЦА 1

Спектральная интенсивность Na, при давлении 10^{-8} мм и плотности тока $0,5 \text{ A/cm}^2$

Длина волны в Å	Относительная	Длина волны в Å	Относительная
11 404—328	0,08	5688—83	0,012
8 195—83	0,15	5154—49	<0,002
6 161—54	0,603	4983—79	<0,005
5 896—90	1,00		

Натрий как щелочной металл (первая группа периодической системы) имеет простой спектр: за пределами так называемых замкнутых электронных оболочек имеется лишь один оптический электрон². Передача энергии от свободного электрона электрону, связанному в атоме, определяется известной функцией выхода³ (рис. 1). Электроны, кинетическая энергия которых, примерно, в два-четыре раза больше энергии, необходимой для возбуждения какой-нибудь линии, имеют наибольшую

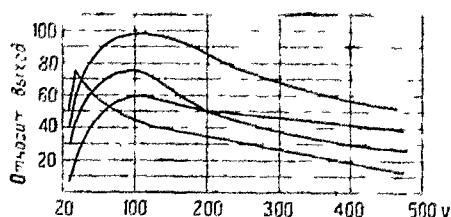


Рис. 1. Относительный выход возбуждения некоторых спектральных линий гелия (потенциал возбуждения между 23 и 24 V) в зависимости от скорости электронов в вольтах.

вероятность⁴ возбудить атом к излучению упомянутой линии. Оптимальная величина этого выхода неодинакова для различных линий, и в пределах одной серии с возрастающим номером линии очень круто падает. Возбужденный атом через некоторое время⁵ (около 10^{-8} сек.) возвращает всю энергию возбуждения в виде светового кванта. Отдача в случае невозмущенных атомов⁶ достигает 100%, т. е. 100% всех атомов отдают энергию возбуждения в виде излучений. При наличии внешних возмущающих факторов отдача уменьшается⁶, так как, во-первых, атомы могут гаситься при столкновениях во время своего возбужденного состояния (удары второго рода). При этом энергия возбуждения может перейти в кинетическую энергию столкнувшейся пары или возбудить атом, который до столкновения не был возбужден. Это случается тем чаще, чем больше плотность частиц. Переход в кинетическую энергию происходит, главным образом, при столкновениях с электронами, реже при столкновениях с атомами (рис. 1).

Во-вторых, возбужденные атомы посредством электронного удара могут получить импульс к дальнейшим квантовым переходам (ступенчатое возбуждение и обратная эмиссия других линий),

В-третьих, световой квант, излученный атомом, может быть поглощен (хотя, по существу, потери энергии для данной длины волны здесь нет, кажущиеся потери энергии увеличиваются). Это происходит при высоком давлении возбужденного пара или газа и особенно сильно для резонансной линии.

Для большой эмиссии резонансной линии, согласно пункту 3, давление возбужденных атомов не должно быть чрезмерно велико; плотность электронов (т. е. плотность тока), согласно пункту 2, не должна быть тоже слишком высокой.

Но при понижении давления паров натрия часть электронов, имеющих оптимальную скорость, не сталкивается с атомами натрия, и разгоняясь приобретает большую скорость. С этим явлением борются, добавляя благородный газ.

Благородные газы отличаются очень высоким потенциалом возбуждения. Электроны, не обладающие достаточной для этого энергией, могут отдать атому благородного газа лишь незначительную часть всей энергии в соответствии с законом импульсов, претерпевая просто упругое отражение⁷.

Так как согласно опыту давление благородного газа можно брать в 10^3 раза больше давления паров натрия, то получается большое количество таких упругих столкновений, которые удлиняют путь электрона от анода к катоду, примерно, в 100 раз. Таким образом значительно возрастает возможность столкновения электрона на пути от анода к катоду с атомом натрия. Согласно законам механики, потеря энергии при упругом ударе обратно пропорциональна массе атома благородного газа. Поэтому тяжелые благородные газы должны быть выгоднее легких. Но опыт показывает, что разница, по крайней мере между тяжелыми благородными газами, невелика^{*}.

Экономичная натриевая разрядная трубка сконструирована следующим образом: она наполнена благородным газом давлением в несколько миллиметров; давление паров натрия в ней составляет от 0,001 до 0,1 мм; она обладает источником электронов; к ней приложено напряжение, необходимое для разгона электронов. Для получения натриевых паров желаемого давления, разрядную трубку нагревают до определенной температуры: например, чтобы получить 0,005 мм нагревают до 260° , 0,05 мм — примерно до 330° , 0,5 мм — до 420° С.

Оказывается, что 70—80% затраченной электронной энергии⁸ превращается в свет, что соответствует 370—420 lm/W. (не считая нагревания, т. е. мощности затраченной на получение необходимого давления паров натрия). Этот высоко экономичный тип ламп применяется для телевидения. Этот опыт, впервые в истории светотехники действительно показал правильность

^{*} Опыт показал, что гелий дает лучшие результаты, чем тяжелые газы. Этот факт не укладывается в простую схему Пирацци и не объяснен полностью до сих пор, (Прим. ред.)

часто высказываемого предположения⁹, что электрическую энергию можно превращать в свет с высоким коэффициентом полезного действия. Этим был также предначертан путь дальнейшего технического развития. Но для перенесения в производство еще нужно было разрешить следующие задачи¹⁰:

- 1) изготовление экономичного и стойкого источника электронов,
- 2) наиболее экономичное нагревание для получения паров, 3) побочное, но необходимое условие: изготовление стекла, которое не разрушается натрием.

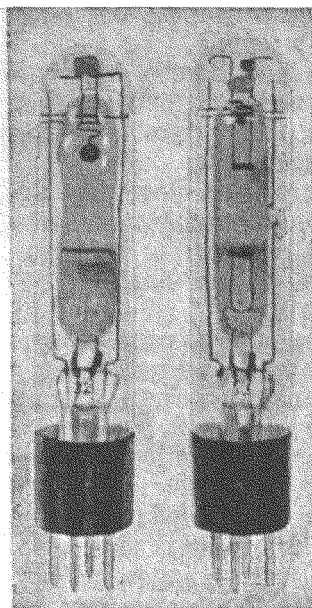


Рис. 2. Маленькие осрамовские натриевые лампы для постоянного и для переменного тока.

Натриевые разрядные трубки появились в результате разрешения этих задач (рис. 2). Источником электронов служат оксидные электроды, сделанные из уплотненной спрессованной смеси вольфрама с окисью бария. Разрядная трубка сделана из особого „натрие-упорного“ боросиликатного стекла. Трубка нагружается настолько большими плотностями тока, что потери на электродах и в самой трубке вызывают сильное нагревание, быстро растущее с увеличением плотности тока, и вполне достаточное для получения паров¹¹.

Собственно разрядная трубка окружена откаченной оболочкой, служащей для тепловой изоляции. Световая отдача такой натриевой лампы (*D*-линии) составляет 60 lm/W . Натриевые лампы находят применение, во-первых, там, где необходим монохроматический свет (спектроскоп, поляриметр, сигналы и т. д.) и, во-вторых, где монохроматический свет не мешает, но даже желателен (растущая разрешающая способность глаза), например, при освещении улиц для автомобильного движения.

Применение высших возбужденных состояний для получения света

У тех атомов, у которых, в противоположность натрию, наиболее сильные видимые линии излучаются при переходах между возбужденными уровнями, например у Mg , Cd , Zn , Hg , Ne , He (рис. 3, схема термов Hg), большую роль при растущих плотностях тока и паров играет более сильное проявление высших членов серий, или серий соответствующих переходам между этими возбужденными уровнями.

Здесь можно заранее ожидать при низкой плотности тока и низком давлении (около 50 mA при Ne давлением в 1 mm)

плохой визуальный коэффициент полезного действия, который фактически и наблюдается. Но у всех этих атомов те уровни, которые излучают, главным образом, видимые линии, имеют очень большую длительность возбужденного состояния (в 10—100 раз большую, чем свойственная исходным уровням *D*-линий);

они отчасти "метастабильны". Достаточно слабого возбуждения, иначе малой плотности тока (около 200 мА/см² у Ne при 1 мм давления) для достижения этих уровней таким образом, чтобы видимые линии вели себя так же, как и резонансные линий. Следовательно, уже при сравнительно небольших плотностях тока и пара можно получить удовлетворительную световую отдачу; при растущих плотностях тока и пара она начинает вскоре уменьшаться. У ртути, где давление без труда можно поднять до 1 атм, наблюдается при больших плотностях тока и давления опять увеличение световой отдачи¹², идущее параллельно с отщуриванием ртутной

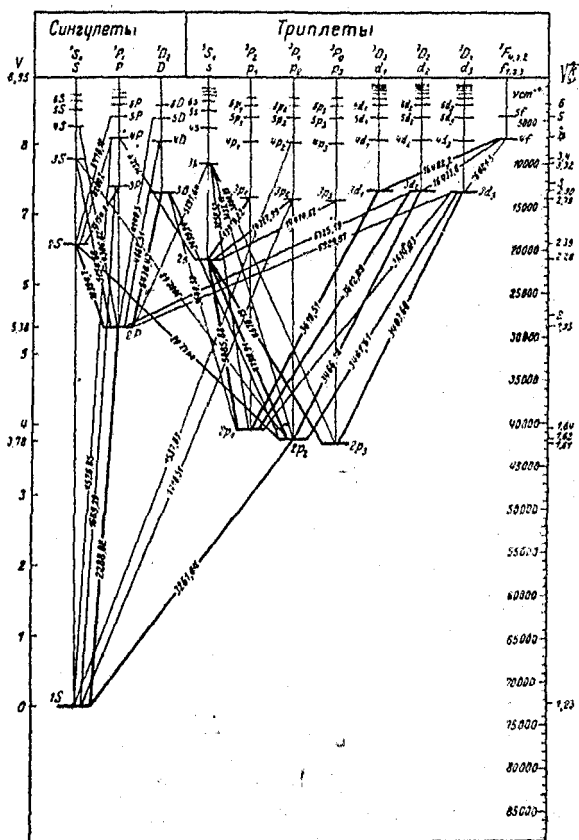


Рис. 3. Схема термов для ртути.

тельная интенсивность резонансной линии. Из распределения интенсивности трубки низкого давления (рис. 4) и трубки высокого давления (рис. 5) видно, что окраска разряда высокого давления приближается к „белой“ (селективный в основном характер ртутного спектра, однако, не изменяется). Еще не вполне ясен механизм этого явления, пока наблюдаемого, главным образом, на металлических парах, также как и основания для дальнейшего повышения экономичности.

Мы имеем у ртути, в противоположность натрию, случай, когда высокое давление и большая удельная нагрузка приводят к более высокому коэффициенту полезного действия. Тех-

ническое применение этих результатов привело к лампе с 50 Lm/W, которая может применяться для уличного освещения (рис. 6). Улучшение цвета этой лампы по сравнению с лампой низкого давления имеет большое техническое значение, так как, вообще, от источника света требуется не только экономичность, но также, чтобы освещенные им предметы не очень уклонялись от привычного нам вида при дневном свете. Для этого в первую очередь тре-

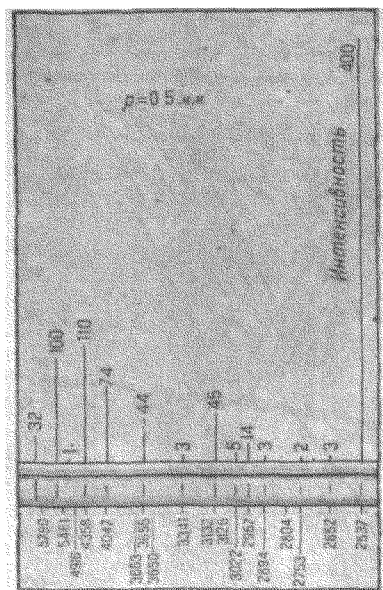


Рис. 4. Распределение интенсивности по спектру ртутного разряда низкого давления в кварцевой трубке. Для сравнения дана спектрограмма той же лампы. Сильное преобладание резонансной линии 2537, II побочная серия ($\lambda = 5461, 4358, 4047$) интенсивнее I побочной серии ($\lambda = 3663/50, 3132/26, 2967 \text{ Å}$). Возбуждение, главным образом, основного уровня (1 в).

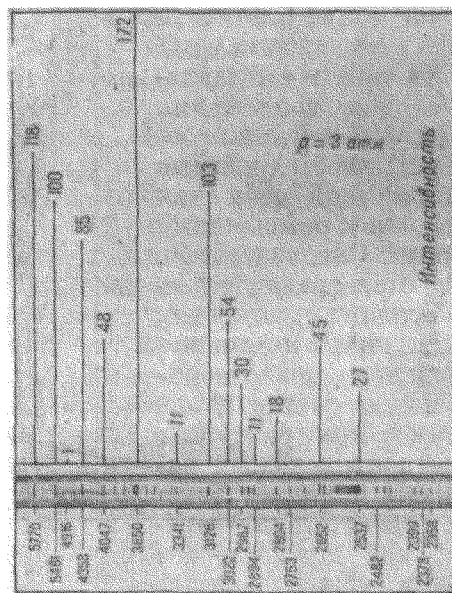


Рис. 5. Распределение интенсивности по спектру ртутного разряда высокого давления. Для сравнения дана спектрограмма той же лампы. Резонансная линия $\lambda = 2537 \text{ Å}$ относительно слаба; большая интенсивность I побочной серии ($\lambda = 3663/50 \text{ Å}$), которая сейчас интенсивнее, чем II побочная серия ($\lambda = 5461$).

буется, чтобы он имел спектр, физически близкий к солнечному¹⁸ или хорошо распределенную по общему спектру эмиссию линий. Ртутная лампа высокого давления почти не излучает в красной части спектра. Поэтому для получения освещения, близкого к дневному, нужно ртутную лампу комбинировать с другими источниками света, излучающими большое количество энергии в красной части спектра; таковы, например, разряд в Ne или лампы накаливания.

Упомянутые теоретические и экспериментальные предпосылки для изготовления источника света с высоким коэффициентом полезного действия, объясненные на примере натрия и ртути, справедливы и для благородных газов, как, напри-
 м., для спектра гелия (линии побочной серии в видимой области „резонансная линия“— $1,08\mu$) и для спектра неона*.

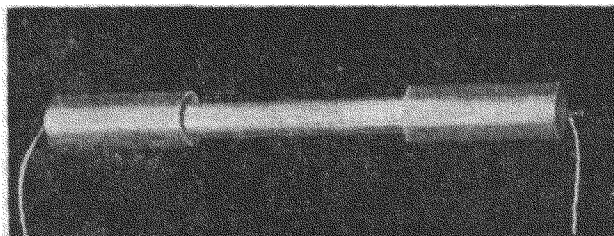


Рис. 6. Осрамовская ртутная лампа высокого давления.

Запрещенные переходы и применение рекомбинационных спектров при возбуждении света

При растущей плотности тока и пара у целого ряда металлов наблюдается появление так называемых запрещенных переходов и рекомбинаций электронов и ионов. Из

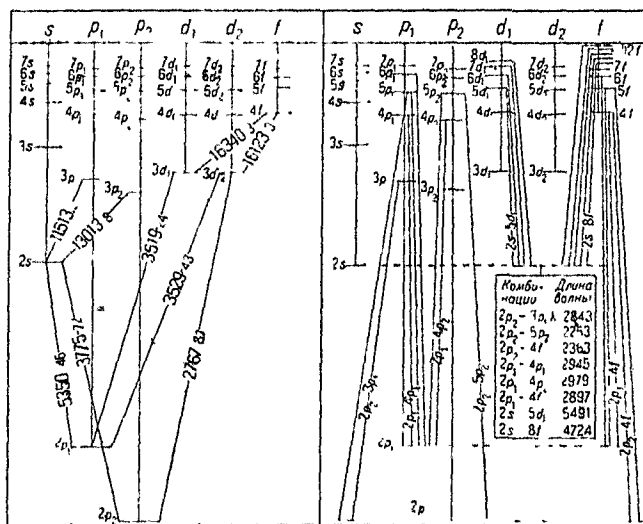


Рис. 7. Световая эмиссия талия в положительном столбе; длины волн даны в Å.

Слева: схема термов Тl с „нормальными“ переходами: I и II побочные серии, главная серия и серия Бергманна. Справа: схема термов Тl с „запрещенными“ переходами, вызванными ионными полями в положительном столбе.

схемы термов атома видно, что „разрешается“ только ограниченное число комбинаций двух уровней энергии (линий); остальные представляют собою так называемые запрещенные переходы или линии. Запрещенные переходы могут появиться, если атом претерпевает сильное возмущение, например, попадает в электрическое поле. В газовом разряде при большой плотно-

* В какой степени эти источники излучений будут хорошими источниками света, зависит от распределения спектральных линий, заданного свойствами атома.

сти электронов и ионов, получаются чрезвычайно большие межмолекулярные поля, и становится вероятной эмиссия запрещенных линий (рис. 7). При этом спектр атома „пополняется“ характерным образом.

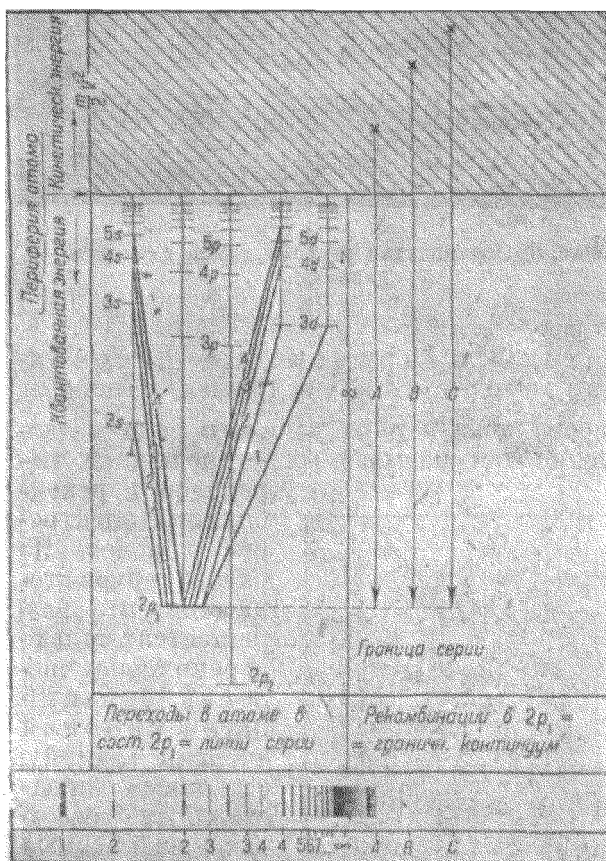


Рис. 8. Схема рекомбинационного спектра (побочные серии талия).

Линии, соответствующие отдельным переходам на схеме термов, помечены на спектрограмме цифрами. Возникновение пограничного континуума схематически показано стрелками А, В и С, которые означают переходы электронов различной кинетической энергии на уровень $2p_1$.

ных Крафтом¹⁴ сначала с Тl, а затем с К, Cs, Rb и др., были получены условия (высокая концентрация ионов и электронов, вызванная сильной ионизацией паров металла), при которых рекомбинация наблюдалась внутри сосуда. При рекомбинации, как показывает эксперимент, предпочитают те уровни, на которых получают наиболее сильное возбуждение и ионизация.

Далее, из схемы термов атома видно, что прерывные уровни энергии стремятся к определенной границе. Эта граница соответствует отделению светового электрона от атома, — ионизации. Обратно: соединение электрона с ионом называется рекомбинацией. Для реионизации, а также и для рекомбинации, как и для всех процессов возбуждения, существует определенная зависимость от скорости электронов, определенная функция вихода. Экспериментальный материал и теоретические соображения показывают, что рекомбинация преобладает у стенок сосуда; внутри сосуда она до последнего времени не наблюдалась. Лишь при исследованиях в положительном столбе у смесей паров металла с благородным газом, проведен-

При рекомбинации у* стенок, освободившаяся энергия большей частью накаляет стенки. Если рекомбинация происходит внутри сосуда, может иметь место радиация. Длина волны испускаемого света соответствует энергии уровня атома, на котором происходит рекомбинация, плюс кинетическая энергия уловленного электрона (рис. 8). В спектре на границе серии видна исключительно непрерывная полоса, интенсивность которой уменьшается в сторону коротких волн (рис. 8). Если этот пограничный континуум лежит в видимой части спектра, как, например, у щелочных металлов, то он повышает световую эмиссию. Вследствие наложения на линейчатый спектр континуума изменяется окраска света. Одновременно усиливаются высшие члены серии, так как увеличивается концентрация атомов на высоких уровнях, вследствие рекомбинации последних; благодаря этому происходит дальнейшее пополнение спектра и иногда можно получить белый свет, например, при Cs (рис. 9). Наконец, „размазывание“ спектра происходит вследствие испускания полос, а именно как молекулами металла, так и молекулами металла с благородным газом¹⁵.

Вышеизложенные соображения, иллюстрированные на нескольких примерах, были уже технически реализованы для многих паров и газов, например, для He, Ne; Na, K, Rb, Cs; Mg, Zn, Cd, Hg; G, In, Tc; N₂, CO₂.

Применение возбуждения излучением флуоресценции молекулярных газов, жидкостей и твердых тел для получения света

При подобном рассмотрении возбуждения люминесценции жидкостей и всякого рода твердых тел, с целью получения света, картина значительно изменяется. Обычно связь атома в молекуле сильно зависит от конфигурации электронов, и при возбуждении перехода электронов изменяются уровни энергии, определяющие силы связей. Это изменение происходит, обычно,

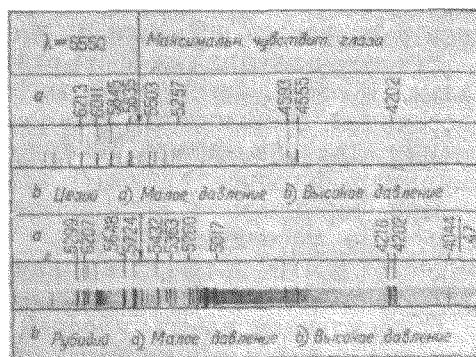


Рис. 9. Влияние давления на распределение энергии по спектру при разряде в цезии и рубидии.

При высоком давлении становится очень интенсивным пограничный континуум и высшие серии [побочная серия (Cs $\gamma = 5100 \text{ \AA}$, Rb $\gamma = 4950 \text{ \AA}$) и серия Бергманна (Cs $\gamma = 6200 \text{ \AA}$, Rb $\gamma = 6500 \text{ \AA}$)]. Спектр „пополняется“ — приближается к дневному свету.

за счет энергии возбуждения, так что энергетический коэффициент полезного действия уже для единичной молекулы при известных обстоятельствах может стать меньше 100% (правильно Стокса). Часть энергии идет на поднятие температуры молекулярного газа. При увеличении плотности коэффициент полезного действия еще ухудшится, так как при столкновениях происходит обмен энергии между движущимися ядрами отдельных молекул. В особенно неблагоприятных случаях, — с точки зрения рационального возбуждения света, — возбуждение совсем не влечет за собой реэмиссии, например, когда возбуждение приводит к диссоциации. Характерным примером плохого коэффициента полезного действия излучений является углеводород.

Эти соображения тем более относятся к жидкостям и твердым телам. Вообще, здесь приходится считаться с таким большим рассеянием энергии, что рациональное возбуждение люминесценции едва ли возможно. Но существуют некоторые исключения, например, флуоресцирующие жидкости.

При термическом возбуждении, напротив, не может быть и речи о рассеянии энергии, так как твердые и жидкие вещества могут посредством нагревания возбуждаться и излучать собственные колебания.

С появлением новых уровней при переходе от атомов к молекулам, а затем к жидким и твердым состояниям, происходит существенное видоизменение спектра. Вновь появляющиеся уровни энергии приводят опять к периодическим процессам сравнительно малой частоты, так как обычно имеют дело с тяжелыми атомными ядрами; их действие проявляется в том, что переходы электронов делятся на большое количество частичных уровней. В жидкостях и твердых телах получают обычно спектр, захватывающий область от инфракрасных лучей до далекого ультрафиолета (спектр абсорбции и флуоресценции), состоящий большей частью из непрерывных полос с лежащими между ними местами большей прозрачности. В редких случаях твердые тела и жидкости дают не непрерывные спектры, например бензол, некоторые анилиновые краски, некоторые щелочноземельные элементы.

Существенно новые явления происходят у металлов. При переходе от газообразного состояния к жидкому, атом металла отдает частью или полностью свои оптические электроны. Остающиеся ионы металла вместе со свободными электронами дают картину, обладающую совершенно другими физическими свойствами: „металлической“ проводимостью, „металлическим“ отражением, непрерывной (с немногими исключениями) абсорбцией, которая так велика, что металлы уже в очень тонких слоях не прозрачны.

Во всяком случае, в области спектра, в которой сосредоточены характерные оптические свойства металлов (следовательно, не в области, например, коротких рентгеновских волн) все

абсорбированная энергия превращается в теплоту, т. е. происходит 100%-ное рассеяние энергии возбуждения. Здесь же уместно поставить вопрос о том, существуют ли, кроме того, до сих пор неизвестные свойства металлов, делающие возможным возбуждение люминесценции.

Результат наших общих рассуждений может быть сведен к тому, что достижение значительного коэффициента полезного действия для излучения определенных, необходимых для получения света, длин волн, тем вероятнее, чем благоприятнее условия для образования и существования отдельных высоко-возбужденных частиц и чем меньше рассеяние энергии. Поэтому принципиально наилучшей возможностью возбуждения света является разряд в атомных газах и парах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cp. Geiger-Scheel, Handb. d. Phys. 19, S. 19, Berlin 1928.
2. Схему термов см. W. Grotrian, Graphische Darstellung der Spektren von Valenzelektronen, Berlin 1928.
3. R. Seeliger, „Ann. Physik“, 59, 613, 1919.
4. W. Hanle, „Z. Physik“ 54, 94, 1919.
5. Cp. P. Pringsheim, Fluoreszenz u. Phosphoreszenz, S. 38, Berlin 1928.
6. Cp., например, B. H. Krefft, M. Pirani, R. Rompe, Tech. wiss. Abh. Osram-Konz., 2, 24, 1931.
7. G. Hertz, Verh. deutsch. physik. Ges., 1917; „Z. Physik“ 32, 298, 1924.
8. M. Pirani, „Z. techn. Physik“ 11, 482, 1930.
9. H. Ebert, „Wiedemanns Ann.“ 53, 160, 1894; Mc. F. Moore, ETZ 1896, S. 637.
10. M. Pirani, ETZ 1930, S. 889.
11. M. Pirani, „Z. angew. Chem.“ 44, 395, 1931.
12. K. Kuch u. Retschinsky, „Ann. Physik“ 22, 515, 1907.
13. Cp. E. Lax u. M. Pirani, Künstliches Tages und Sonnenlicht, Vortr. Int. Illuminat. Congr. 1931.
14. H. Krefft, „Naturwiss.“ 19, 269, 1930; „Physik Z.“ 32, 948, 1931.
15. Cp. H. Krefft u. R. Rompe, „Z. Physik“, 73, S. 681 (1931) и R. Rompe, „Z. Physik“, 74, S. 175 (1932).