

В. И. ГАПОНОВ

ЭЛЕКТРОНИКА

II

ФИЗМАТГИЗ · 1960

В. И. ГАПОНОВ

ЭЛЕКТРОНИКА

ЧАСТЬ II

ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

*Допущено Министерством
высшего и среднего специального образования РСФСР
в качестве учебного пособия
для высших учебных заведений*

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
МОСКВА 1960

Гапонов Виктор Иванович.
ЭЛЕКТРОНИКА, ЧАСТЬ II.
Редактор *В. Б. Брагинский.*

Техн. редактор *Н. Я. Мурашова.*

Корректор *А. С. Бакулова.*

Сдано в набор 14/IV 1960 г. Подписано к печати 21/XI 1960 г. Бумага 60 × 92¹/₁₆. Физ.
печ. л. 37,0. Условн. печ. л. 37,0. Уч.-изд. л. 38,87. Тираж 25 000 экз. Т-08996.
Цена книги 12 р. 65 к. С 1/I 1961 г. цена 1 р. 27 к. Заказ № 1472

Государственное издательство физико-математической литературы.
Москва, В-71. Ленинский проспект, 15.

Отпечатано с матриц во 2-й типографии Военного издательства
Министерства обороны Союза ССР
Ленинград, Д-65, Дворцовая пл., 10

ОГЛАВЛЕНИЕ

Глава 4. Электронно-лучевые, электроннографические и фотоэлектрические приборы	5
§ 31. Католюминесценция. Экраны электроннографических приборов	6
§ 32. Просвечивающие электронные микроскопы и электронографы	16
§ 33. Эмиссионные электронные микроскопы	31
§ 34. Электровакуумные фотоэлементы и фотоэлектронные умножители	44
§ 35. Электроннооптические преобразователи	67
§ 36. Электронно-лучевые трубки для осциллографии и приема изображений. Электронные переключатели	73
§ 37. Передающие телевизионные трубки. Запоминающие трубки (потенциалоскопы)	93
§ 38. Спектроскопия электронных и ионных лучей	115
Глава 5. Электронные лампы	126
§ 39. Диод	127
§ 40. Электростатическое поле и полный ток в триоде	145
§ 41. Первичное токораспределение в триоде	162
§ 42. Характеристики и параметры триодов. Применения триодов и примеры конструкций	170
§ 43. Триод в динамическом режиме. Недостатки триодов	188
§ 44. Лампы с экранирующей сеткой (тетроды и пентоды)	197
§ 45. Электронные лампы с двумя управляющими сетками	217
§ 46. Флуктуационные шумы электронных ламп и фотоэлектрических приборов	235
§ 47. Внешнее оформление электронных ламп длинноволнового диапазона. Лампы для широкополосного усилителя. Некоторые специальные лампы	251
Глава 6. Сверхвысокочастотные электронные лампы	262
§ 48. Пролетные колебания в триодах с положительной сеткой и в магнетронах. Колебания в разрезном магнетроне с падающей характеристикой	263
§ 49. Сверхвысокочастотные триоды и многосеточные лампы	278
§ 50. Клистроны	295
§ 51. Лампа с бегущей волной и лампа с обратной волной	314
§ 52. Многорезонаторные магнетроны	334
Глава 7. Ионные приборы	349
§ 53. Ионизационные методы измерения и получения вакуума	349
§ 54. Ионные вентили и газоразрядные стабилизаторы	357
§ 55. Газоразрядные источники света	384

§ 56. Ионизационные камеры и счетчики	399
§ 57. Высокочастотные разряды. Разрядники антенных переключателей	417
Глава 8. Полупроводниковые электронные приборы	431
§ 58. Свойства контакта между металлом и полупроводником и между полупроводниками с электронной и дырочной проводимостью	431
§ 59. Полупроводниковые выпрямители	461
§ 60. Полупроводниковые сопротивления	469
§ 61. Фотопроводимость и фотосопротивления. Вентильные фотоэлементы	476
§ 62. Введение носителей тока в германий. Нитевидный полупроводниковый триод	504
§ 63. Плоскостные полупроводниковые триоды	520
§ 64. Полупроводниковые приборы с точечными контактами. Полупроводниковые триоды с поверхностными барьерами	556
Приложения	
§ VI. Вычисление потенциала поля плоской решетки	573
§ VII. Система обозначений электровакуумных и полупроводниковых приборов	576
Литература	581
Предметный указатель	588

Г Л А В А 4

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ, ЭЛЕКТРОННОГРАФИЧЕСКИЕ И ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

Большая часть настоящей главы посвящена электронно-лучевым и электроннографическим приборам. Электронно-лучевым (ионно-лучевым) прибором называется электровакуумный прибор, в котором электронный (ионный) поток имеет форму тонкого пучка лучей. Те из электронно-лучевых приборов, в которых с помощью электронных лучей получается видимое изображение на экране, покрытом люминофором или на фотопластинке, называются электроннографическими приборами [Л.А.16]. К этим классам приборов принадлежат осциллографические и телевизионные трубки, электронные микроскопы, электронные переключатели и т. п.

Наиболее существенной частью электронно-лучевых и электроннографических приборов является устройство, обеспечивающее движение электронов по траекториям, образующим тонкий пучок. Для расчета и конструкции этой части прибора пространственный заряд в пучке, действие которого сводится к расширению пучка, заметному только при больших плотностях тока (см. § 11), имеет небольшое значение. Поэтому основные свойства электронно-лучевых приборов можно изучать, не принимая во внимание действие пространственных зарядов. То же самое можно сказать и о приборах, основанных на использовании фотоэлектронной и вторичноэлектронной эмиссии, описание которых включено в настоящую главу (фотоэлементы, фотоэлектронные умножители, электронооптические преобразователи).

Из сказанного выше, однако, не следует, что пространственный заряд не оказывает вовсе никакого воздействия на работу электронно-лучевых и фотоэлектрических приборов. Это влияние не определяет собой основных свойств прибора, но в некоторых отношениях оно вполне заметно. Например, вблизи катода электронного прожектора, служащего для формирования электронного пучка, влияние пространственного заряда очень существенно и не менее важно, чем в электронных лампах; это влияние заметно в некоторых режимах в газонаполненных фотоэлементах и т. д.

§ 31. Катоодолюминесценция. Экраны электроннографических приборов

1. Природа катоодолюминесценции. Рассмотрим некоторые явления, возникающие при попадании потока первичных электронов на поверхность неметаллического кристалла и часто сопровождающие вторичноэлектронную эмиссию. Далеко не все вторичные электроны, появившиеся под действием электронной бомбардировки внутри кристалла, оказываются эмиттированными. Проследим судьбу вторичных электронов, оставшихся в кристалле, решетка которого имеет различные дефекты и связанные с ними акцепторные и донорные уровни.

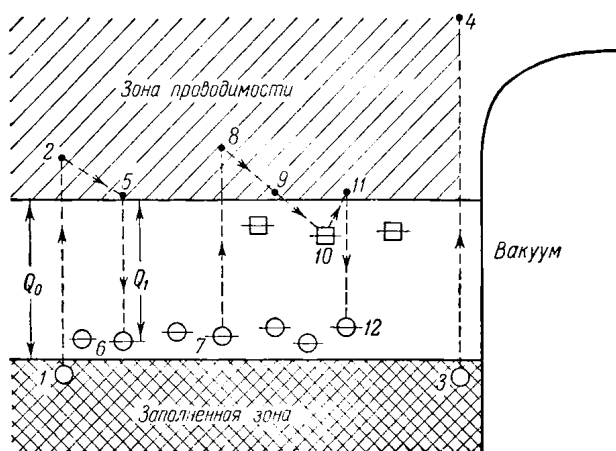


Рис. 243. Зонная схема возникновения катоодолюминесценции.

Первичные электроны ионизируют атомы решетки. Это значит, что некоторые электроны переходят из заполненной зоны в зону проводимости. Так как первичные электроны обладают значительной энергией, то вторичные электроны большей частью получают энергию, более чем достаточную для перехода в зону проводимости, и вначале оказываются на уровнях, лежащих много выше нижнего края этой зоны (переходы 1—2, 3—4 на рис. 243). С уровня 4 электрон, очевидно, может быть эмиттирован. Кроме того, появление добавочных электронов в зоне проводимости будет менять проводимость кристалла (явление «возбужденной проводимости»). В плохо проводящем кристалле нижние уровни зоны проводимости большей частью свободны и в результате теплового обмена энергией переброшенные электроны будут быстро (в течение примерно 10^{-9} сек по теоретическим расчетам) опускаться к нижнему краю зоны (переход 2—5). У электрона в положении 5 имеются две возможности для рекомби-

нации с дыркой: во-первых, возможен переход прямо в заполненную зону с испусканием кванта $h\nu_0 = Q_0$ и, во-вторых, переход на один из акцепторных уровней с испусканием кванта $h\nu_1 = Q_1$ (переход 5 — 6), причем $Q_1 < Q_0$. Теоретический расчет дает, что первая возможность маловероятна и в действительности имеют место переходы на локальные примесные уровни. Локальные уровни в реальном кристалле не вполне одинаковы в соответствии с несколько различными условиями, существующими в различных дефектных местах решетки. Поэтому излучение, возникающее при бомбардировке кристалла потоком электронов, занимает целую полосу спектра. Это явление носит название катодолюминесценции. На нем основано действие экранов телевизионных трубок, электроннооптических преобразователей и других приборов. Вещества, дающие свечение катодолюминесценции в видимой части спектра, называются катодолюминофорами.

В электроннографических приборах экраны работают в очень различных условиях. В осциллографических и телевизионных трубках экран возбуждается лучом с высокой плотностью тока (до нескольких ампер на квадратный сантиметр в проекционных кинескопах), пробегающим с большой скоростью по поверхности экрана. В приборах, работающих с неподвижными лучами, например в электроннооптических преобразователях, плотность тока порядка сотых долей микроампера, но время возбуждения очень велико. Напряжение пучка электронов в различных случаях колеблется от сотен вольт до десятков киловольт. Таким образом, время возбуждения, скорость электронов и мощность электронного пучка меняются в очень широких пределах.

Из описанного выше механизма катодолюминесценции следует, что в зависимости от энергии первичных электронов будут меняться яркость и кпд катодолюминесценции, т. е. доля энергии первичных электронов, переходящая в энергию свечения, но не ее спектр (кпд для большинства технических люминофоров составляет 4—6%). Спектр катодолюминесценции — неизменная характеристика вещества. Более того, если электроны переброшены в зону проводимости не электронной бомбардировкой, а каким-либо иным способом, например действием света, то спектр получающейся таким путем фотолюминесценции будет тождествен или, по крайней мере, очень близок к спектру катодолюминесценции [Л. 4.1, т. I, § 26], и можно говорить о независимости спектра люминесценции от способа его возбуждения.

Это правило, однако, соблюдается только для однородных люминофоров с одним видом излучающих центров люминесценции. Спектр экрана, состоящего из механической смеси нескольких люминофоров, для которых кпд люминесценции различным образом меняется в зависимости от возбуждения; будет также зависеть от способа возбуждения, например будет меняться при изменении скорости первичных электронов. Из теории катодолюминесценции следует, что она возникает и исчезает не мгновенно. После начала возбуждения в течение

некоторого времени разгорания достигаются установившееся состояние и полная яркость, а после прекращения возбуждения свечение исчезает в течение некоторого времени затухания или послесвечения. Время послесвечения является одним из важнейших параметров люминофора.

Процесс $1—2—5—6$ (рис. 243), завершающийся излучением, протекает весьма быстро. Между тем опыт показывает, что в некоторых кристаллах катодолюминесценция наблюдается в течение нескольких секунд и даже минут после прекращения бомбардировки первичными электронами. Катодолюминесценция с длительным послесвечением не укладывается в только что изложенную теоретическую схему.

Предположим, что существуют локальные дефекты, способные захватывать электроны из зоны проводимости и задерживать их длительное время. Такие дефекты можно назвать электронными «ловушками» и соответствующие им уровни — уровнями прилипания. С уровнем прилипания электроны освобождаются тепловым движением и попадают вновь в зону проводимости, откуда и совершают переход с излучением. Весь процесс на рис. 243 изображен переходами $7—8—9—10—11—12$. Появление наряду с простыми переходами типа $1—2—5—6$ переходов с заходом в ловушку 10 объясняет явление послесвечения. Надо сказать, что природа уровней прилипания не во всех случаях выяснена, но описанное здесь явление послесвечения не единственное указание в пользу их существования. С фактами, говорящими в пользу существования «ловушек», приходится встречаться при изучении фотосопротивлений и полупроводниковых триодов.

Выше была рассмотрена катодолюминесценция, возникающая в определенных местах решетки — ее дефектах, служащих центрами люминесценции. Люминофоры такого класса называются кристаллолюминофорами, и к ним принадлежат вещества, применяемые в экранах электронно-лучевых трубок.

Природа дефектов, служащих центрами свечения в технических люминофорах, может быть различной. В некоторых люминофорах ими могут быть избыточные атомы одной из компонент основной решетки кристалла, получающиеся при термической обработке. Примером таких люминофоров являются ZnO и сульфиды ZnS , CdS . Но гораздо чаще встречаются и имеют большое значение для технических экранов люминофоры, требующие для работы внесения посторонних примесей атомов. Люминофор в этом случае называют активированным, а примесный элемент (чаще всего металл) — активатором. Упомянутые выше сульфиды также могут быть активированы примесными металлами. От рода примеси зависит спектр люминесценции, и ее концентрация при наибольшей яркости подбирается эмпирически. Наиболее действенными и часто применяемыми активаторами являются Cu , Mn , Ag и Zn .

Процесс возбуждения люминесценции иногда значительно отличается от описанного выше. Так, возможна люминесценция без изменения проводимости кристалла — такие примеры известны в случае фотолюминесценции. Существуют также люминофоры, свечение которых не исходит из распределенных по решетке центров. Люминесцентные свойства таких веществ присущи всем элементам решетки кристаллов, химически чистые образцы которых дают свечение.

2. Яркость люминесценции. Технические люминофоры почти всегда предназначаются для работы в видимом спектре. Поэтому важной характеристикой катодолюминесценции служит ее яркость. Энергия катодолюминесценции должна возрастать вместе с энергией потока возбуждающих электронов, и так как ее спектр при этом не меняется, то можно ожидать, что яркость видимого излучения также будет возрастать. Опыт показывает в соответствии с только что сказанным, что яркость катодолюминесценции можно найти по формуле

$$B = Aj(U_s - U_{s0})^m, \quad (31.1a)$$

где j — плотность электронного тока, U_s — потенциал экрана и A , m и U_{s0} — постоянные, характеризующие вещество. Постоянная m для разных люминофоров лежит в пределах примерно от 1,3 до 2,8, но определение ее, так же как и определение A и U_{s0} , встречает большие экспериментальные трудности и, кроме того, A , m и U_{s0} сильно зависят от способа изготовления экрана. Поэтому численные данные, встречающиеся у разных авторов, расходятся, и в частности, в ранних исследованиях принимали часто $m = 1$. Формула (31.1) при этом принимает вид

$$B = Aj(U_s - U_{s0}). \quad (31.2a)$$

Согласно (31.2) B линейно зависит от энергии возбуждающих электронов. Формулой (31.2) пользуются и в настоящее время, если нет необходимости в большой точности.

Постоянная U_{s0} называется мертвым потенциалом; она дает наименьшую энергию электрона eU_{s0} , при которой возможно возбуждение катодолюминесценции. Для технических экранов U_{s0} лежит в пределах от нескольких десятков до 300 в. Но, как известно, ширина зоны запрещенных уровней Q_0 не превосходит нескольких электропovolт и такая большая величина минимальной энергии представляется непонятной.

Это противоречие объясняется тем, что на поверхности каждого экрана имеется неактивный слой, в котором нарушено нормальное строение люминофора, и электрону, чтобы проникнуть к области, где расположены излучающие центры, нужно «пробить» неактивный слой. Отсюда следует, что U_{s0} можно уменьшить, подбирая соответствующий способ изготовления экрана, и действительно, в таких экранах U_{s0} снижается до 10 — 15 в, т. е. в этом случае eU_{s0} понижается

до величины порядка Q_0 . Таким образом, не приходится сомневаться, что мертвый потенциал U_{s0} — свойство поверхностного слоя люминофора.

На практике нередки случаи, когда $U_{s0} \ll U_s$; тогда с достаточной точностью

$$B = Aj U_s^m. \quad (31.3)$$

3. Вторичная эмиссия люминофоров и потенциал экрана. Из физического смысла формул (31.1а) и (31.2а) следует, что в них должен входить потенциал экрана U_s , так как именно эта величина определяет энергию электронов в момент попадания на экран. Между тем эти формулы часто пишут в виде

$$B = Aj (U_a - U_{s0})^m, \quad (31.16)$$

$$B = Aj (U_a - U_{s0}), \quad (31.26)$$

где U_a — напряжение на ускоряющем электроде.

В частности, формула (31.26) (формула Ленарда) в течение многих лет использовалась в литературе по катодолюминесценции. Противоречие отпадает, если $U_s \approx U_a$,

и действительно, на практике часто встречаются режимы, где это приближенное равенство выполняется. Нужно, следовательно, рассмотреть, как зависит U_s от потенциала ускоряющего электрода U_a .

Для ответа на этот вопрос надо сначала установить, как стекают с экрана попадающие на него заряды. Заряды не могут с достаточной скоростью стекать ни по стеклу, ни по люминофору вследствие их плохой проводимости (для технических люминофоров $\rho = 10^{12} - 10^{14}$ ом·см). Ионы остаточного газа даже в трубках с газовой фокусировкой также могут перенести только ничтожно малый заряд. Заряд с экрана, следовательно, уносится вторичными электронами, и в установившемся режиме количество уходящих с экрана

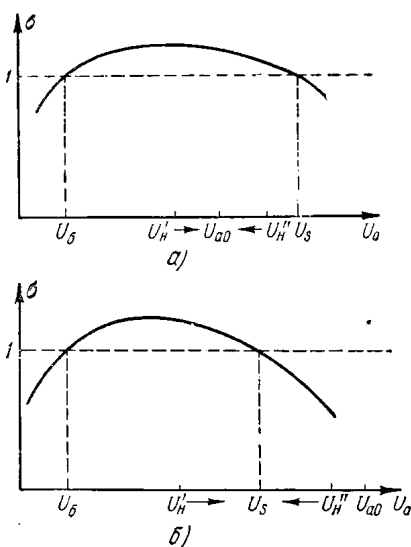


Рис. 244. Установление потенциала экрана.

а — случай $U_a < U_s$; б — случай $U_a > U_s$.

вторичных электронов равно количеству попадающих на него первичных.

Кривая зависимости коэффициента вторичной эмиссии σ люминофора от ускоряющего потенциала первичных электронов U_a имеет вид, обычный для этих кривых (рис. 244; ср. с рис. 174). Коэффициент вторичной эмиссии $\sigma > 1$ в интервале от $U_a = U_0$ до $U_a = U_s$.

Для технических люминофоров $U_6 = 120 - 140$ в, а U_s измеряется тысячами вольт. Установившийся потенциал экрана U_3 может зависеть от ускоряющего потенциала U_a и от потенциала экрана до падения на него электронов (начального потенциала U_n).

Расположение электродов электронного прожектора и экрана показано на рис. 245.

Пусть $U_n < U_6$, а U_a имеет какое угодно значение. При этих условиях $\sigma < 1$ и потенциал экрана падает до тех пор, пока не прекратится электронная бомбардировка, т. е. до тех пор, пока U_3 не сравняется с потенциалом катода. В этом состоянии все первичные электроны отражаются, т. е. формально $\sigma = 1$, и установившееся значение U_3 равно нулю (если пренебречь скоростями вылета электронов из катода).

Пусть теперь $U_6 < U_a = U_{a0} < U_s$ и $U_6 < U_n < U_s$ (рис. 244, а). Возможны два случая: $U_n = U_n' < U_{a0}$ и $U_n = U_n'' > U_{a0}$. В обоих случаях $\sigma > 1$, но в первом случае поле между экраном, действующее на вторичные электроны, уводит их на анод и потенциал экрана растет. Во втором случае поле возвращает вторичные электроны на экран, потенциал которого падает. Очевидно, равновесие было бы достигнуто при $U_3 = U_a$, если бы начальная скорость вторичных электронов равнялась нулю. В действительности начальная энергия вторичных электронов в среднем составляет $10 - 20$ эв и равновесие наступает при U_3 несколько большем, чем U_a . Кроме того, наш вывод справедлив, если можно пренебречь полем пространственных зарядов. Для экранов обе поправки незначительны и можно считать (если $U_6 < U_a < U_s$), что $U_3 \approx U_a$. Этим объясняется кажущееся противоречие между формулами (31.1а) и (31.1б). В состоянии равновесия число вторичных электронов, уходящих на анод, в точности равно числу первичных электронов (не считая рассеянных первичных электронов, попавших прямо на анод), так что ток пучка можно измерить, включая прибор в цепь анода.

Таким образом, потенциал экрана следует за ускоряющим потенциалом U_a , с изменением которого меняется яркость. Однако U_3 следует за U_a только до известного предела.

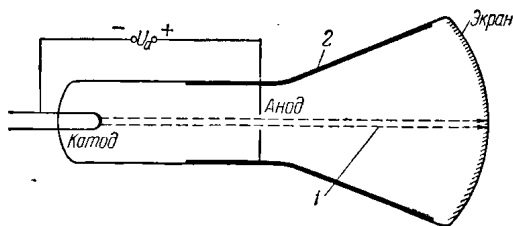


Рис. 245. Упрощенная схема электронно-лучевой трубки.

1 — первичные электроны; 2 — подключенное к аноду проводящее покрытие.

* Заметим, что сказанное здесь применимо к потенциалу изолированного металлического электрода, например к потенциалу изолированного анода триода, с той только разницей, что здесь возможна большая поправка на пространственный заряд.

В самом деле, пусть $U_a = U_{a0} > U_s$ и $U_n > U_6$ (рис. 244). Если при этом $U_n = U'_n < U_s$, то поле между экраном и анодом ускоряет вторичные электроны, и так как $\sigma > 1$, то потенциал экрана растет, приближаясь к U_s . Если же $U_n = U''_n > U_s$, то независимо от того, как направлено поле вблизи экрана, потенциал его падает, так как $\sigma < 1$ и U_s опять-таки приближается к U_s . Отсюда следует, что U_s — наибольший потенциал, которого может достичь экран; его называют предельным потенциалом. Значения U_s даны в табл. 1. Рабочее ускоряющее напряжение обычно лежит между U_6 и U_s , и в этом же интервале находится, значит, потенциал экрана U_s . Остается объяснить, почему в электронно-лучевой трубке начальный потенциал экрана U_n всегда оказывается больше, чем U_6 , и пятно на экране автоматически вспыхивает сразу же после подачи напряжения на проектор.

После подачи напряжения до потенциала, большего U_k , сначала заряжается стекло баллона непосредственно у места впая вводов электродов. Электроны полем направляются на места, заряженные до высокого потенциала, что вызывает новое повышение потенциала, так как здесь $\sigma > 1$. Так как стекло не является идеальным изолятором, то с мест, заряженных до высокого потенциала, положительные заряды будут стекать на соседние участки: можно сказать, что по стеклу, а затем и по экрану начнет распространяться зарядная волна, повышающая от участка к участку потенциал всей поверхности трубки. На места с повышенным потенциалом попадают электроны, вызывающие люминесценцию стекла и экрана. Этим воспользовались С. И. Катаев и Н. А. Баршай для того, чтобы наблюдать распространение зарядной волны. После того как распространение зарядной волны закончено, вся поверхность трубки оказывается заряженной до одинакового потенциала и электронные лучи делаются прямолинейными, образуя пятно в центре экрана. В нормальных условиях весь описанный процесс протекает настолько быстро, что пятно на экране вспыхивает почти мгновенно [Л. 4.3, гл. 3].

4. Технические катодолуминофоры. В технике к катодолуминофорам могут предъявляться весьма разнообразные требования. Приведем несколько примеров. Экран приемной телевизионной трубки должен иметь послесвечение достаточно короткое, чтобы к началу передачи кадра исчезало полностью свечение, возбужденное предшествовавшим кадром. Но, с другой стороны, очень малое время послесвечения способствует появлению мелькания изображения и должно быть найдено компромиссное решение. В радиолокационных индикаторах кругового обзора (при не очень большой скорости вращения антенны) желательно иметь длительное послесвечение, а в осциллографах, смотря по их назначению, могут потребоваться как экраны с длительным, так и с коротким послесвечением.

Цветность, точнее, спектр, свечения выбирается в зависимости от того, будет ли изображение на экране фотографироваться или наблю-

даться визуально. В первом случае выгодно свечение с преобладанием сине-фиолетовых лучей, во втором — желто-зеленых. Для черно-белой телевизионной передачи нужно белое свечение, которое можно получить, изготавливая экран из механической смеси люминофоров, излучающих дополнительные цвета и имеющих одинаковое по возможности время послесвечения. Для экранов большой яркости полезно иметь высокое значение предельного потенциала U_s .

К числу свойств, наличие которых всегда желательно и часто необходимо для всех люминофоров, следует отнести большую светотдачу (или кпд), стойкость по отношению к перегреву, загрязнению и электронной и ионной бомбардировке и хорошие вакуумтехнические качества (легкое обезгаживание, низкое давление паров).

В настоящее время известно большое число катодолюминофоров, применение которых позволяет изготавливать экраны с удовлетворительными техническими свойствами для самых различных электроннографических приборов.

Сводка основных параметров некоторых употребительных катодолюминофоров приведена в табл. 1 (несколько дополненная таблица

Таблица 1

Свойства употребительных люминофоров

№ пп.	Химический состав	Цвет	Эффективность (отдача) [св/вт]	Время послесвечения [сек]	Предельный потенциал U_s [кв]
1	Сульфид цинка $ZnS[Ag]$	Синий	0,9 — 1,2	$2 \cdot 10^{-2}$	8,5 — 12
2	Сульфид цинка $ZnS[Cu]$	Зеленый	5,0 — 1,7	$4 \cdot 10^{-3}$	
3	Цинк-кадмий сульфид ($ZnS: CdS$) [Ag]	Желтый при содержании компонент 50%/50%	5,0 — 6,5	$2 \cdot 10^{-6}$	7 — 12
4	Цинк-сульфид-селенид ($ZnS: ZnSe$) [Ag]	Желтый	5,0 — 8,0	10^{-3}	16 — 25
5	Белый сульфидный $ZnS[Ag]; (ZnS: CdS) [Ag]$	Белый	5,0 — 5,5	—	—
6	Белый сульфид-селенид цинка $ZnS[Ag]; (ZnS: ZnSe) [Ag]$	»	4,5 — 6,0	—	—
7	Видлемент (ортосиликат цинка) $Zn_2SiO_4[Mn]$	Зеленый	1,8 — 2,1	10^{-2}	6,5 — 10
8	Вольфрамат кальция $CaWO_4$	Синий	0,14—0,18	10^{-5}	4,5 — 5

из [Л. 4.5, гл. 5], составленная по данным А. В. Москвина). Во втором столбце таблицы указан химический состав люминофора, причем сначала указывается соединение, образующее основную решетку, и затем в квадратных скобках указан металл-активатор. Соединения, образующие твердый раствор, заключены в круглые скобки. Люминофоры, входящие в виде механических смесей, отделены точкой с запятой. Эффективность (отдача) и время послесвечения (пятый и шестой столбцы) зависят от влияния многих факторов, и поэтому их значения, приведенные в таблице, следует рассматривать как ориентировочные.

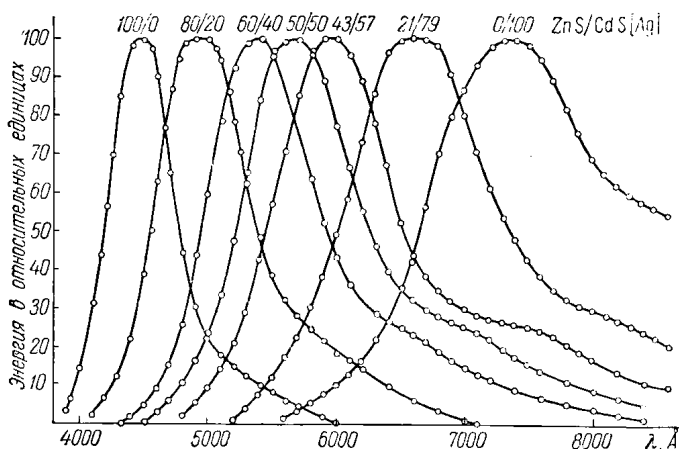


Рис. 246. Спектры люминофора ZnS: CdS [Ag] при разном содержании компонент.

В первых трех строках таблицы приведены данные, характеризующие весьма распространенные сульфидные люминофоры, дающие свечение большой яркости. Третья строка относится к люминофору, основная решетка которого образована твердым раствором ZnS и CdS . Спектр люминесценции этого люминофора сильно зависит от содержания обеих компонент (рис. 246). Как видно из рисунка, максимум излучения можно сдвинуть в любое место видимой части спектра. Влияет на спектр и концентрация активатора, но значительно слабее. Подбором состава можно изменять время послесвечения сульфидных люминофоров от микросекунды до нескольких минут. Цинк-сульфид-селенид (четвертая строка) интересен высоким значением предельного потенциала U_s . В пятой и шестой строках указаны механические смеси люминофоров, дающие белое свечение, а в седьмой и восьмой строках стоят данные, характеризующие представителей силикатных (виллемит) люминофоров и вольфраматов. Эти люминофоры отличаются высокой стойкостью.

Несколько слов об экранах. Экран состоит из ровного, тонкого слоя измельченного люминофора, закрепленного на стекле баллона с помощью вещества, обладающего хорошими связующими свойствами и не затрудняющего откачку прибора. Технология изготовления люминофоров, их нанесение на экран, обработка экрана и последующий контроль качества довольно сложны и описываются в специальной литературе [Л. 4.1, т. II].

В радиолокационных трубках, где требуется длительное послесвечение, часто применяются толстослойные, так называемые каскадные экраны. Электроны возбуждают поверхностный слой люминофора, излучение которого в свою очередь возбуждает более глубоко лежащие, ближайшие к стеклу колбы слои.

Время послесвечения каскадных экранов измеряется секундами [Л. 4.4, т. II, гл. 18].

Многими преимуществами обладают металлизированные экраны, в которых слой люминофора со стороны вакуума покрыт тонкой алюминиевой пленкой. Полностью устраняется ионное пятно (о его природе см. § 36), так как ионы не проходят сквозь слой алюминия, проницаемый для электронов. Металлическая пленка отражает свет люминесценции и увеличивает эффективность экрана, несмотря на то, что часть электронов теряется в металлической пленке. Наконец, наличие металлической пленки позволяет подать прямо на экран какое угодно напряжение, превышающее предельный потенциал U_s люминофора. Поэтому в трубках, где требуется большая яркость, например в проекционных телевизионных трубках, металлизированные экраны дают лучшие результаты.

Упомянем еще об экранах с темновой записью. Обычно для таких экранов применяется хлористый калий, типичный ионный кристалл, очень прозрачный во всей видимой части спектра. В решетке хлористого калия могут существовать вакантные места в узлах, нормально занятых атомами калия и атомами хлора. Опыт показывает, что локализованные в вакантном узле решетки хлора электроны становятся центрами поглощения света. При бомбардировке слоя KCl электронами происходит выбрасывание электронов из заполненной полосы, причем часть их оказывается локализованной в вакантных узлах решетки хлора, образуя центры поглощения. В местах попадания первичных электронов экран начинает сильно поглощать свет и в отраженном свете будет темным. Центры поглощения в экране из хлористого калия оказываются чрезвычайно устойчивыми, и темновая запись может оставаться на экране без изменения много часов и даже дней. Для ее удаления приходится нагревать или сильно освещать экран.

Обзор экспериментальных и теоретических работ по катодолюминесценции, а также изложение технологии катодолюминофоров и экранов даны в монографии А. В. Москвина [Л. 4.1]. О свойствах экранов см. также [Л. 4.4, т. 2].

§ 32. Просвечивающие электронные микроскопы и электронографы

Можно думать, что отправной точкой при разработке электронного микроскопа послужило открытие волновой природы электронов (1924—1927 гг.). Как известно, уже при легко достижимых на опыте скоростях электронов длина электронных волн много меньше длин волн не только видимого, но и ультрафиолетового света (§ 1). Разрешающая сила микроскопа при уменьшении длины волны возрастает; об этом следствии волновой оптики ниже будет сказано подробнее. С помощью электронного микроскопа можно было, следовательно, надеяться уменьшить величину наименьшего доступного наблюдения объекта на несколько порядков по сравнению со световыми микроскопами. Поэтому разработке электронного микроскопа, начиная со времени появления первых, еще очень несовершенных его образцов, посвящалось много усилий, несмотря на то, что получение и наблюдение изображения в электронных лучах гораздо менее удобно, чем в лучах световых, из-за необходимости помещения объекта в вакуум и применения флуоресцирующих экранов или фотопластинок для регистрации изображения, непосредственно недоступного глазу.

1. Световой микроскоп. Напомним коротко свойства светового микроскопа. На рис. 247, А представлен ход лучей в проекционном микроскопе, который дает изображение объекта на экране с помощью проекционной линзы, заменяющей окуляр, применяемый для визуальных наблюдений. Ход лучей определяется законами геометрической оптики, на основании которых легко показать, что общее увеличение микроскопа M равно произведению увеличений объектива $M_{об}$ и проекционной линзы $M_{пр.л.}$, т. е.

$$M = M_{об} M_{пр.л.} \quad (32.1)$$

Для получения большого увеличения линзы микроскопа должны быть по возможности короткофокусными. Фокусное расстояние объектива может достигать десятых долей миллиметра.

Геометрическая оптика, давая правильную оценку увеличению микроскопа, не может, однако, ничего сказать о его наиболее важном параметре — наименьшем разрешаемом расстоянии. Чтобы найти разрешаемое расстояние, нужно рассмотреть образование изображения с точки зрения волновой теории [Л.А.1, т. II, гл. 18; Л.А, т. III, гл. 28].

Дифракционная теория микроскопа приводит к такому результату: если объектом служат два некогерентных точечных источника света, то они могут восприниматься наблюдателем на изображении как два отдельных источника, если расстояние между ними не меньше, чем

$$\delta_{дифр} = \frac{0,61\lambda}{n \sin u}, \quad (32.2)$$

где n — показатель преломления среды, в которой находится объект, и u — апертурный угол объектива; $n \sin u$ называют апертурным чис-