

луч, горловина трубы делается узкой. Электронная пушка в трубах с магнитным управлением имеет примерно такую же конструкцию, как и в трубах с электростатическим управлением.

Она содержит (рис. 7.5) подогревный катод K , модулятор M и анод A .

Фокусирующая катушка ΦK создает магнитное поле, которое позволяет сфокусировать электронный луч на экране. Две пары взаимно перпендикулярных отклоняющих катушек OK создают магнитное поле, позволяющее отклонять электронный луч соответственно и по горизонтали, и по вертикали.

СИСТЕМА МАГНИТНОЙ ФОКУСИРОВКИ ЛУЧА

Система магнитной фокусировки в электронно-лучевых трубах построена на взаимодействии сил магнитного поля фокусирующей катушки с ускоряющим электрическим полем анода (рис. 7.6).

Рассмотрим движение электронов в однородном магнитном поле. Как известно, на электрон, движущийся в магнитном поле, действует сила

$$E = HqV \sin \alpha, \quad (7.3)$$

где H — напряженность магнитного поля, q — заряд электрона, V — скорость электрона, α — угол между направлением тока и магнитной силовой линией поля.

Следовательно, на электрон, движущийся вдоль силовой линии магнитного поля, т. е. под углом $\alpha = 0$, поле не оказывает влияния. Максимальное воздействие поле окажет на электрон, траектория движения которого перпендикулярна вектору магнитной индукции B :

$$F_{\max} = HqV. \quad (7.4)$$

Направление силы можно найти по правилу правой руки. Вектор силы F направлен перпендикулярно направлению скорости и направлению магнитных силовых линий магнитного поля. Как известно, в этом случае электрон будет двигаться по окружности, которая находится в плоскости, перпендикулярной силовым линиям магнитного поля.

Сила F , которой магнитное поле действует на электрон, равна по величине и противоположна по направлению центробежной силе, возникающей вследствие движения электрона по окружности:

$$F_{\Pi} = mV^2/r, \quad (7.5)$$

где

$$F = F_{\Pi}, \quad mV^2/r = HqV, \quad r = mV/(Hq) — радиус окружности. \quad (7.6)$$

Обратите внимание на то, что чем больше m — масса движущейся частицы, тем больше радиус. Так как у электрона масса во много раз меньше массы иона, то траектория электрона заметно искривляется, в то время как на траекторию иона магнитное поле воздействует во много раз слабее.

Период вращения электрона

$$T = 2\pi/\omega, \quad \text{а} \quad \omega = 2\pi/T,$$

где ω — угловая скорость.

Как известно, угловая скорость связана с линейной скоростью формулой $\omega = V/r$. Следовательно $V/r = 2\pi/T$. Отсюда период

$$T = 2\pi m/(Hq). \quad (7.7)$$

Подставив в эту формулу значение r из (7.6), получим

$$T = \frac{2\pi mV}{Hq} = \frac{2\pi m}{Hq}, \quad (7.8)$$

m — масса электрона и q — его заряд — постоянные величины; следовательно, период T зависит только от напряженности магнитного поля.

Рассмотрим общий случай, когда угол между направлением движения электрона и направлением магнитной силовой линии $\alpha \neq \pi/2$. В этом случаеектор скорости V можно разложить на две составляющие — тангенциальную V_t и нормальную V_n . Благодаря составляющей V_n электрон будет совершать круговое движение, а за счет составляющей V_t — дополнительное прямолинейное равномерное движение, поэтому результатирующей траектории станет винтовая линия с шагом $S = V_t T$ (рис. 7.6).

Если в однородном магнитном поле движется электронный луч, состоящий из многих электронов, у которых составляющие V_n различные, но V_t одинаковые, то результатирующие траектории будут представлять собой винтовые линии с различными радиусами, но одинаковым шагом. Так как период вращения электрона T и путь S не зависят от составляющей скорости V_n , то электроны, вылетевшие из одной точки и совершившие один оборот радиусом r , пропорциональным V_n , вновь собираются в одной точке — фокусе.

Таким образом, при изменении напряженности магнитного поля меняется период вращения, а следовательно фокусное расстояние. Существенный недостаток системы фокусировки с помощью магнитного поля — в значительном усложнении конструкции и удлинении горловины, на которой размещается катушка, так как однородное магнитное поле можно создать в относительно длинной катушке. В трубах, где производится преобразование электрической энергии в световую, применяют для фокусировки короткую катушку, создающую неоднородное магнитное поле. Для того чтобы увеличить неоднородность магнитного поля фокусирующей катушкой, необходимо

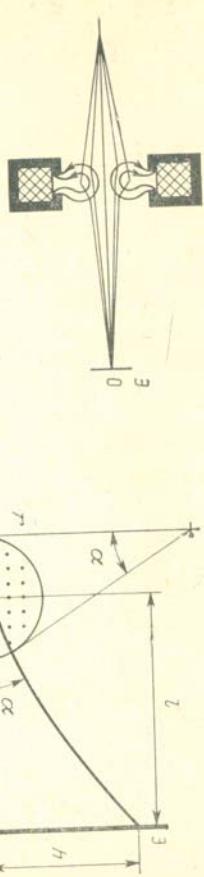


Рис. 7.7. Фокусировка электронного луча с помощью магнитного поля

Рис. 7.8. Отклонение электронного луча с помощью магнитного поля

ющей катушки, в ее сердечнике делают воздушный зазор. Под действием магнитного поля короткой фокусирующей катушки электроны будут двигаться по сложной траектории, которая представляет собой часть витка спирали (рис. 7.7). В области, лежащей непосредственно под воздушным зазором, на электроны действует сила, прижимающая электрон к оси трубы. При этом чем больше отклонился электрон от оси трубы, тем больше сила магнитного поля, прижимающая его к оси. Это приводит к тому, что электроны, которые влетели в магнитное поле под зазором, под различными углами пересекают ось трубы на одинаковом расстоянии от зазора. Регулируя ток в фокусирующей катушке, меняют величину магнитной индукции и сил, действующих на электрон, чтобы траектории электронов пересекались в точке на экране.

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА МЕТОДОВ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ И МАГНИТНОЙ ФОКУСИРОВКИ

Недостаток магнитной фокусировки в том, что для создания магнитного поля нужна сравнительно большая мощность за счет значительного тока, который протекает через катушку, в то время как электростатическая система фокусировки практически не потребляет ток и мощность. Регулировка магнитной фокусирующей системы сложней, чем электростатической. В процессе работы электростатическая фокусировка практически не требует регулировки, в то время как магнитная фокусировка требует подстройки, так как при протекании тока провод катушки нагревается, его сопротивление увеличивается, следовательно, меняется ток в катушке, напряженность магнитного поля и силы, действующие на электроны, что приводит к смещению точки, где сходятся электроны.

МАГНИТНАЯ СИСТЕМА ОТКЛОНЕНИЯ

Магнитная система отклонения содержит две пары отклоняющих катушек, которые расположены перпендикулярно друг другу. Катушки надеты на горловину трубы. Конструкцию катушек подбирают таким образом, чтобы поле, созданное ими, было практически однородным. Анализ движения электронов в магнитном поле показывает, что электроны, находясь в этом поле, движутся по дуге окружности, а при выходе из поля — по прямой, касательной к дуге окружности. Движение по окружности смещает электроны на определенный угол в зависимости от тока, протекающего в катушках (рис. 7.8).

Рассмотрим, какие факторы влияют на отклонение луча и чувствительность трубы при магнитном отклонении. Определим радиус окружности, по дуге которой движется электрон, войдя в магнитное поле катушки.

$$\text{Полставив (6.1) в (7.6), получим}$$

$$r = \frac{m}{Hq} \sqrt{\frac{2qU_a}{m}} = \frac{1}{H} \sqrt{\frac{2mU_a}{q}}. \quad (7.9)$$

Чем меньше радиус окружности r , тем сильнее искривается траектория электронов и больше отклонение луча на экране. С помощью дальнейших математических преобразований для небольших углов отклонения получаем формулу для определения отклонения электронного луча на экране

$$h = idH \sqrt{\frac{q}{2mU_a}}, \quad (7.10)$$

где l — расстояние между отклоняющими катушками и экраном, d — диаметр отклоняющих катушек.

Итак, отклонение заряженных частиц в магнитном поле зависит от их массы. Если в отклоняющее поле попадут не только электроны, но и ионы, у которых масса во много раз больше массы электрона, при том же заряде, то электроны будут отклоняться магнитным полем, а ионы заметного отклонения не получат и будут двигаться под действием ускоряющего поля к центру экрана. При этом возникнет опасность разрушения экрана под действием бомбардировки тяжелыми ионами в центре. При электростатическом отклонении согласно (7.1) отклонение луча не зависит от массы, и электроны и ионы будут одинаково отклоняться по всему экрану. Для защиты экрана от разрушающего действия ионов при магнитном отклонении луча приходится покрывать экран тонкой металлической пленкой, прозрачной для электронов и не пропускающей ионов.

Так как в магнитном поле напряженность

$$H = IW, \quad (7.11)$$

где I — ток в отклоняющих катушках, а W — количество витков, то

$$h = idIW \sqrt{\frac{q}{2mU_a}}. \quad (7.12)$$

Отклонение луча тем больше, чем больше ток I и больше количество W в отклоняющих катушках.

Отклонение h прямо пропорционально расстоянию от центра катушек до экрана l , так как луч при этом движется дальше времени. С ростом анодного напряжения отклонение луча h будет уменьшаться.

Однако если при электростатическом отклонении h обратно пропорционально первой степени U_a , то при магнитном отклонении — корню квадратному из U_a .

Следовательно, увеличение напряжения U_a при магнитном отклонении допустимо в гораздо больших пределах, чем при электростатическом. Отклонение луча линейно зависит от амплитуды тока в отклоняющих катушках. Следовательно, чтобы луч за равные промежутки времени проходил по экрану равные расстояния, амплитуда тока в отклоняющих катушках должна меняться по линейному закону.

Чувствительность трубы с магнитным отклонением численно равна отклонению луча (в мм) на один ампервиток катушки отклонения:

$$h_0 = \frac{h}{IW} = \frac{IdVq}{\sqrt{2U_a m}}. \quad (7.13)$$

В данном случае чувствительность характеризует возможность отклоняющей магнитной системы при небольших изменениях тока в отклоняющих катушках обеспечить заметное отклонение луча на экране.

Чувствительность будет тем больше, чем дальше от экрана расположены отклоняющие катушки и чем меньше анодное напряжение.

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ И МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ОТКЛОНЕНИЯ

Система магнитного отклонения имеет ряд достоинств по сравнению с электростатической:

1. Основное преимущество магнитной системы заключается в том, что она позволяет работать при больших анодных напряжениях, что обеспечивает возрастание яркости свечения экрана, так как чувствительность трубы при электростатическом отклонении обратно пропорциональна первой степени анодного напряжения, а при магнитном — корни квадратному из напряжения U_a .

2. Магнитное отклонение дает возможность отклонять луч на больший угол, чем электростатическое. Благодаря этому баллон трубы при магнитном отклонении для данной плоскости экрана можно сделать компактней (короче по длине).

Недостаток магнитной системы в том, что ее частотный диапазон гораздо уже, чем при электростатической системе отклонения. Это объясняется тем, что с увеличением частоты возрастает индуктивное сопротивление отклоняющих катушек. Как известно, наличие индуктивности замедляет процесс изменения тока, поэтому на высоких частотах, которые требуются, например в осциллографах, для наблюдения процессов в высокочастотных цепях, магнитная система отклонения работать не может. При электростатическом отклонении максимальная частота f_{max} составляет сотни мегагерц, при магнитном — десятки килогерц. Поэтому в осциллографических трубках применяют систему электростатического отклонения и фокусировки.

7.4. ЭКРАНЫ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫХ ТРУБОК

Напомним, что экран представляет собой тонкий слой люминофора, нанесенный на внутреннюю поверхность баллона электронно-лучевой трубы. Люминофоры представляют собой вещества, которые обладают способностью светиться при бомбардировке их

электронами с достаточной для этого энергией. В качестве люминофоров применяют различные соединения цинка, кадмия, бериллия, магния, кальция.

К экранам электронно-лучевых трубок предъявляют следующие требования:

максимальная световая отдача, т. е. получение максимальной яркости при меньших затратах мощности;

получение заданной длительности послесвечения;

максимальный срок службы.

В соответствии с этими требованиями определяются параметры экрана:

Световая отдача численно равно излучаемой силе света (в кандалах) на 1 Вт мощности излучения:

$$K = I/P \text{ кандала/Вт.}$$

Мощность электронного луча

$$P = I_l / (U_{a2} - U_0),$$

где I_l — ток луча, U_{a2} — анодное напряжение второго анода, U_0 — минимальное напряжение, при котором начинается свечение. При $U_{a2} < U_0$ энергии электронов недостаточно для возбуждения электронов и переводя их на внешнюю неустойчивую орбиту.

Световая отдача экрана незначительна (меньше 10%), остальная часть энергии электронного луча расходуется на вторичную эмиссию с поверхности экрана и невидимое рентгеновское излучение.

Послесвечение экрана — это постепенное исчезновение свечения экрана после прекращения его бомбардировки. Время, в течение которого яркость свечения уменьшается до 1% своего максимального значения, называется временем послесвечения.

Условно послесвечение делятся на группы — короткое (от $10^{-5} \dots 10^{-2}$ с), среднее ($10^{-2} \dots 10^{-1}$ с) и длительное ($0,10^{-1} \dots 15$ с). При этом различают очень короткое послесвечение — меньше 0,01 с и очень длительное — больше 15 с. Требуемая длительность послесвечения зависит от тока электронно-лучевой трубы, ее назначения.

Требуемой длительности добиваются выбором вещества люминофора, каждое из которых характеризуется своим временем послесвечения. Очень длительного времени послесвечения добиваются, применяя двухслойные экраны. Первый со стороны луча слой возбуждается за счет бомбардировки электронами и своим излучением возбуждает электроны во втором слое, который пансируется непосредственно на стекло баллона трубы. Второй слой поддается таким образом, чтобы под воздействием облучения первого луча, которое является ультрафиолетовым, он давал большее послесвечение.

Вторичная эмиссия. Потенциал экрана. Ранее уже отмечалось, что наряду с возбуждением атомов люминофора в трубке имеет место вторичная эмиссия. Вещества, применяемые в качестве лю-

минофоров, являются полупроводниками, т. е. обладают очень незначительной проводимостью. При бомбардировке экрана электронами луча и накоплении их на его поверхности экран получил бы отрицательный заряд, потенциал экрана постепенно снизился бы, что привело бы к созданию тормозящего поля для электронов луча. Таким образом, в данном случае вторичная эмиссия — полезное явление, благодаря которому происходит отвод электронов с экрана. Благодаря ей устанавливается динамическое равновесие, которое позволяет поддерживать стабильную работу экрана. Напряжение на экране U_s , должно быть примерно равно напряжению на втором аноде U_{a2} . Это напряжение устанавливается автоматически, так как при $U_s < U_{a2}$ число уходящих вторичных электронов увеличивается и соответственно увеличивается потенциал экрана. Вторичные электроны, ушедшие с экрана, притягиваются к аквадагу, расположенному вблизи экрана.

Таким образом, в трубке создается замкнутая цепь — электронный, вылетающий с катода, бомбардирует экран, создавая вторичный анод, а оттуда на источник питания, минус которого соединен с катодом.

7.5. ТИПЫ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫХ ТРУБОК

Оscиллографические трубы. Как уже отмечалось, в электронных осциллографах, как правило, используют трубы с электростатической фокусировкой и отклонением.

Осциллографические трубы позволяют изображение электрических сигналов, которые меняются во времени. Для получения таких изображений исследуемое напряжение подается на пластину вертикального отклонения (рис. 7.9, а). Если на горизонтальные пластины не подавать напряжения, то луч будет прочерчивать вертикальную линию, высота которой пропорциональна амплитуде напряжения исследуемого сигнала. Чтобы увидеть на экране сигнал, необходимо произвести горизонтальную развертку так, чтобы за равные промежутки времени луч прохо-

дил одинаковые расстояния. Для этого напряжение, которое подается для горизонтального отклонения, должно нарастать по линейному закону. В этом случае в отсутствие напряжения на пластинах U на экране будет прямая горизонтальная линия, пропечерченная лучом. Через определенный промежуток времени, когда луч покидает данную точку, свечение исчезает.

Чтобы глаз не увидел затемнения, луч должен прочертить каждую точку множество раз, пока ведется наблюдение, поэтому напряжение, подаваемое на пластину X , имеет пилюобразную форму (рис. 7.9, б). Пока луч движется слева направо, напряжение возрастает по линейному закону (нарастающая часть пилы), как только луч достигает крайней правой точки экрана, напряжение спадает до нуля и луч возвращается в крайнюю левую точку, после чего напряжение снова возрастает. При этом используется свойство инерции глаза, т. е. его способность сохранять зрительное ощущение в течение некоторого времени после прекращения воздействия. Эта инерция составляет примерно 0,1 с.

Двухлучевые трубы. Эти осциллографические трубы позволяют наблюдать на экране две осциллограммы, т. е. исследовать два одновременно протекающих процесса в электрических цепях с помощью двух электронных прожекторов и двух независимых отклоняющих систем. Для уменьшения взаимного влияния прожекторы разделены металлической пластиной, являющейся электростатическим экраном.

Здесь, как и в однолучевой трубке, предусмотрено смещение каждого изображения по вертикали и горизонтали. Существуют и многолучевые трубы, у которых более двух прожекторов.

Кинескопы. Электронно-лучевая трубка, в которой происходит преобразование телевизионных электрических сигналов в видимое изображение, называют **кинескопом**. Кинескопы используют в телевизионных приемниках и в контрольных устройствах для наблюдения телевизионных сигналов.

Электронный прожектор кинескопа также содержит катод, модулятор и аноды, назначением которых является формирование электронного луча, его ускорение и фокусировка.

Кинескопы работают при освещении и должны обеспечить достаточно большую яркость, которую можно получить только при очень высоких ускоряющих напряжениях до 10...20 кВ, поэтому в кинескопах применяют только магнитное отклонение.

Благодаря магнитному отклонению можно подавать более высокое напряжение на второй анод, сохранив требуемую чувствительность. Магнитная система позволяет получить угол отклонения до 110° по диагонали и уменьшить поэтому длину кинескопа, следовательно, и габаритные размеры всего телевизионного приемника.

В настоящее время основная фокусировка в кинескопах электростатическая, но имеются кинескопы и с магнитной фокусировкой.

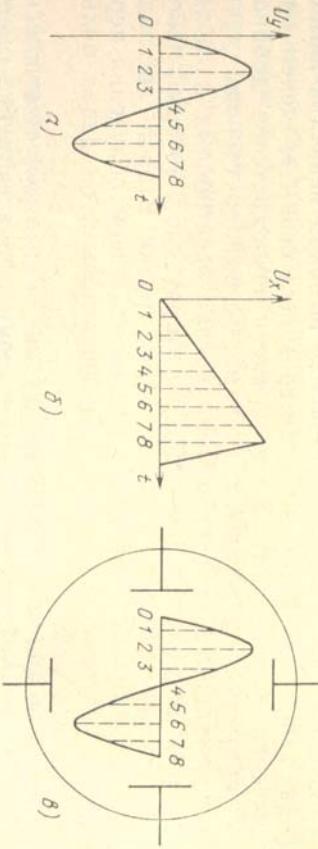


Рис. 7.9. Получение осциллограммы на экране осциллографа

Экраны современных кинескопов, как правило, прямоугольной формы. Для получения белого свечения люминофор изготавлиают из материалов, которые в результате бомбардировки электронным лучом дают суммарное свечение белого цвета.

Экран с внутренней стороны покрывают очень тонким слоем алюминия, прозрачным для электронов. Алюминизация экрана повышает его яркость за счет отражения лучей света, направленных на внутреннюю поверхность колбы. Слой алюминия соединен внутри трубы со вторым анодом.

Система обозначенений электронно-лучевых приборов включает три независимых элемента:

1. Кинескопы, применяемые в цветном телевидении, состоят из которых должны сходиться в соответствующих точках на экране.

четыре элемента.

Первый элемент — число, обозначающее диаметр или размер диагонали экрана в сантиметрах.

Второй элемент — две буквы. Осциллографические трубы с электростатическим управлением — ЛО, с электромагнитным — ЛМ, кинескопы — ЛК.

Третий элемент — число, обозначающее порядковый номер прибора.

Четвертый элемент — буква, обозначающая тип люминофора экрана: Б — белый, И — зеленый и т. д.

Например, 8ЛО4И — осциллографическая трубка с электростатическим управлением, порядковый номер разработки — четвертый, цвет свечения люминофора — зеленый.

Выходы. 1. Основное достоинство электромагнитной системы отклонения в том, что она дает возможность получить большую чувствительность трубы при тех же анодных напряжениях, а при той же чувствительности — большую яркость, чем электростатическая система.

2. Достоинство электростатической системы отклонения — возможность работы на гораздо более высоких частотах, чем при электромагнитной системе.

3. Основными параметрами экрана являются световая отдача и длительность послесвечения. Требуемой длительности послесвечения добиваются соответствующим выбором вещества люминофора.

4. Потенциал экрана равен примерно потенциалу второго анода. Динамическое равновесие между этими потенциалами поддерживается благодаря второй эмиссии электронов с экрана на второй анод.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объясните принципы фокусировки электронного луча с помощью магнитного поля.

2. Объясните принципы отклонения электронного луча с помощью магнитного поля.

3. Почему при больших анодных напряжениях используется магнитная система отклонения?
4. Объясните принцип получения изображения на экране осциллографической трубы.

ГЛАВА 8. ИОННЫЕ ПРИБОРЫ

8.1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РАЗРЯДЫ В ГАЗАХ

Ионными или газоразрядными приборами называют электровакуумные приборы, использующие электрический разряд в газах или парах. В газоразрядных приборах носителями электрического тока являются электроны, а также положительные и отрицательные ионы газового наполнителя. В качестве наполнителя используют пары ртути, водород и инертные газы. Давление в приборе может составлять от десятых долей до десятков паскалей. Ионные приборы разделяют на неуправляемые и управляемые. К неуправляемым относятся двухэлектродные приборы, управляемые приборы содержат три или больше электродов.

Ионные приборы используют в импульсных устройствах, стабилизаторах напряжений, газоразрядных приборах запиты проводных линий связи от наводимых высоких напряжений, в качестве коммутаторов высоковольтных генераторов импульсов, в гидролокационной и радиолокационной аппаратуре, для контроля электромагнитного поля в радиопередающих трактах СВЧ диапазона, в различных типах индикаторов, в качестве вентилей управляемых и управляемых выпрямителей и т. д.

Если в какой-либо газовой среде имеются свободные электроны, то они при своем движении неизбежно сталкиваются с атомами или молекулами газа. В результате этих столкновений может быть нарушена устойчивость системы атома или молекулы. Возможно несколько случаев нарушения устойчивости таких систем, из которых наиболее характерными являются возбуждение и ионизация атома. Если ударяющий электрон обладает малой кинетической энергией, то отрыв электрона от нейтрального атома невозможен, а возможно только изменение энергетического состояния атома — возбуждение атома. Если ударяющий электрон обладает достаточным запасом кинетической энергии, то может произойти отрыв электрона и вместо нейтрального атома образуются положительный ион и свободный электрон, т. е. произойдет ионизация. При соударении с нейтральным атомом электрона, имеющего малую кинетическую энергию, возможно его сцепление с нейтральным атомом. В этом случае будет образован отрицательный ион. Вероятность образования отрицательных ионов зависит не только от скорости ударяющего электрона, но и от природы газа. Минимальное количество энергии, необходимое для возбуждения атома, определяется его потенциалом возбуждения, а минималь-

ное количество энергии, необходимое для ионизации атома, — потенциалом ионизации. Возбужденное состояние атома не является устойчивым. Через промежуток времени около $10^{-7} \dots 10^{-10}$ с атом испускает квант энергии излучения и самостоятельно переходит в нормальное энергетическое состояние. Одновременно с процессом ионизации газа или паров ртути происходит воссоединение ионов и электронов в нейтральные атомы. Процесс воссоединения положительных ионов и электронов и образования при этом нейтральных атомов носит название *рекомбинации*.

В зависимости от степени ионизации газа, приложенного напряжения и тока, протекающего через него, различают следующие виды разрядов: *тихий* или *тесный*, *тлеющий*, *дуговой*. Если разряд поддерживается внешним ионизатором (например, накаленным катодом), то такой разряд называется *несамостоятельный*. Если разряд существует без непрерывного воздействия первоначального ионизатора, то такой разряд называется *самостоятельный*.

Различные виды газового разряда можно проследить при снятии вольт-амперной характеристики в двухэлектродном приборе с холодным катодом, наполненным газом под давлением около $1 \dots 10^4$ Па или $10^{-2} \dots 10^2$ мм рт. ст. (рис. 8.1). При небольшом положительном напряжении на аноде E_a через прибор протекает неизначительный ток, который обусловлен начальной ионизацией газа. С увеличением напряжения E_a ток возрастает и достигает насыщения (участок АБ). Дальнейшее увеличение напряжения E_a приводит к увеличению кинетической энергии электронов, в результате чего происходит ударная ионизация атомов газа, и ток через прибор увеличивается (участок ВВ'). В этом случае происходит газовый разряд, который называется *тихим несамостоятельным* разрядом. Данный разряд применяется в газонаполненных фотоэлементах для умножения тока начальной ионизации.

При дальнейшем увеличении тока положительные ионы скапливаются в междуэлектродном промежутке и меняют распределение потенциала между электродами так, что почти все падение

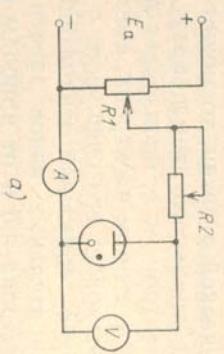
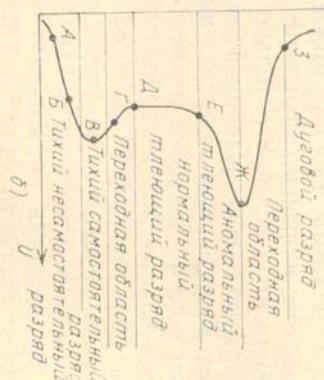


Рис. 8.1. Электрический разряд в газе:

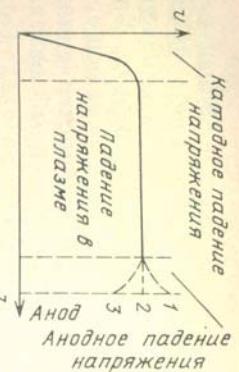


б) — вольт-амперная характеристика

напряжения на приборе оказывается сосредоточенным вблизи катода. Энергия, которую приобретают положительные ионы, становится достаточной для выбивания электронов из катода, и при соответствующем их числе возникает самостоятельный разряд. Характер самостоятельного разряда зависит от ограничивающего или балластного сопротивления R_b . При больших сопротивлениях R_b (около 1 МОм) имеет место *тихий самостоятельный разряд* (участок ВГ) или его разновидность — *коронный разряд*. При $R_b = 10 \dots 100$ кОм участок ВГ отсутствует, и сразу устанавливается *нормальный тлеющий разряд* (участок ДЕ). Падение напряжения на приборе в этом случае составляет около 100 В. Ток, протекающий через прибор, может составлять единицы или десятки миллиампер.

Тлеющий разряд получил свое название по характерному свечению вблизи поверхности катода, которое вызвано интенсивной ионизацией атомов, а также рекомбинацией электронов и ионов. Примененное к прибору напряжение почти полностью сосредоточено вблизи катода, создавая так называемое *нормальное падение напряжения*. Нормальное катодное падение напряжения зависит от свойства материала катода и рода газа. С увеличением тока увеличивается светящая поверхность катода, с которой выбываются электроны. Это приводит к постоянству падения напряжения на приборе, пока вся поверхность катода не покроется свечением (участок ДЕ'). Это свойство разряда используется для стабилизации напряжения в *стабилитронах тлеющего и коронного разряда*.

Дальнейшее увеличение тока становится возможным только за счет увеличения энергии ионов. Поэтому падение напряжения на приборе начинает возрастать. Такой разряд называется *аномальным тлеющим разрядом* (участок ЕЖ). При аномальном тлеющем разряде наблюдается яркое свечение столба разряда, причем интенсивность свечения увеличивается с ростом тока. Это свойство используется в газосветных лампах, применяемых в качестве модулятора света в факсимильной аппаратуре, устройствах звукоzapиси и т. д. Уменьшение сопротивления R_b или увеличение напряжения E_a приводит к увеличению тока через прибор, и аномальный тлеющий разряд скачком переходит в *самостоятельный дуговой разряд* (участок выше точки Ж), характеризуемый большими токами (до сотен ампер) и малым падением напряжения ($10 \dots 30$ В). При дуговом разряде эмиссия электронов с катода осуществляется за счет создания вблизи катода электрического поля, образованного ионами газа (*автоэлектронная эмиссия*). Автоэмиссия возникает тогда, когда материал катода легко испаряется при нагреве, она используется в ртутных выпрямителях, где катодом является жидккая ртуть. Основное падение напряжения, как и при тлеющем разряде, сосредоточено вблизи катода. Остальной участок междуэлектродного пространства заполняется сильно ионизированным газом — плазмой. Плазма



вследствие чего устанавливается динамическое равновесие. Распределение потенциала между анодом и катодом при дуговом разряде приведено на рис. 8.2.

Вблизи анода может иметь место небольшое падение напряжения, величина и знак которого зависят от формы анода и тока, протекающего через прибор. Если число электронов соответствует анодному току I_a , то анод будет иметь потенциал плазмы (кривая 2). Если на анод попадает электронов больше, чем это обусловлено током I_a , то анод заряжается отрицательно по отношению к плазме. Между анодом и плазмой появится положительно заряженная ионная оболочка. Появление положительного пространственного заряда приводит к изменению знака анодного падения напряжения (кривая 3). Поле между анодом и плазмой будет противодействовать движению электронов из плазмы к аноду. При малых размерах анода и недостаточном поступлении на него электронов потенциал анода будет повышаться (кривая 1).

Несамостоятельный дуговой разряд происходит при накаленном катоде и используется в газотронах и тиратронах. Газотроны представляют собой двухэлектродный прибор с накаливаемым катодом, наполненным паром ртути или инертным газом. Тиратрон дугового разряда представляет собой газонаполненный трехэлектродный прибор с накаливаемым катодом. За счет введения управляющего электрода имеется возможность управлять началом зажигания в тиратроне. Тиратроны дугового разряда использовались в управляемых выпрямителях. В настоящее время газотроны и тиратроны дугового разряда вытесняются преимущественно диодами и используются редко. Самостоятельный дуговой разряд происходит в ртутных выпрямителях, где катодом служит жидккая ртуть. Вблизи катода возникает большая напряженность электрического поля, в результате чего происходит так называемая автозелектронная эмиссия, за счет которой поддерживается дуговой разряд.

8.2. ИОННЫЕ ПРИБОРЫ С ХОЛОДНЫМ КАТОДОМ

Стабилитрон — газоразрядный прибор, который использует самостоятельный тлеющий или коронный разряд. Стабилитрон состоит из холодного катода, выполненного в виде металлическо-

Рис. 8.2. Распределение потенциала между анодом и катодом прибора при дуговом разряде

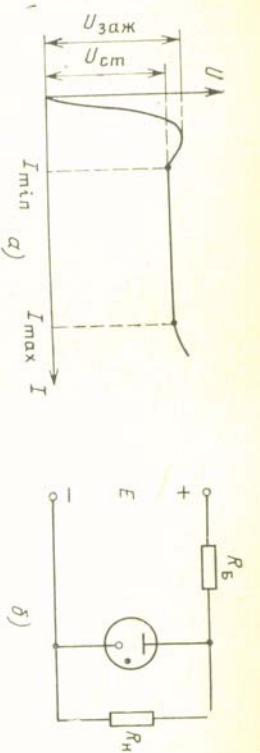


Рис. 8.3. Газовый стабилизатор напряжения:
а — волнт-амперная характеристика стабилитрона, б — схема включения стабилитрона

го цилиндра, и стержневого анода, помещенного внутри цилиндра. Анод и катод размещают в стеклянной или металлокерамической колбе, которая заполнена смесью инертных газов (неон — аргон, аргон — гелий). При подаче на анод положительного напряжения, большего, чем напряжение зажигания, в стабилитроне возникает тлеющий разряд. При токе больше минимального (рис. 8.3, а) устанавливается нормальный тлеющий разряд, и напряжение на стабилитроне остается почти постоянным, пока вся поверхность катода не покроется свечением. Дальнейшее увеличение тока может происходить только за счет увеличения плотности тока, т. е. увеличения напряжения на приборе.

Параметрами стабилитрона являются напряжение зажигания, напряжение стабилизации, максимальный и минимальный токи. Стабилитроны используют в качестве стабилизаторов напряжений (рис. 8.3, б) при напряжении стабилизации от 70 В и выше, при использовании коронного разряда — до нескольких киловольт. Газоразрядные стабилитроны по сравнению с полупроводниковыми обеспечивают более высокую температурную стабильность, но имеют большие габаритные размеры и меньшую механическую прочность и диапазон рабочих токов. Стабилитроны предназначены для работы только в цепях постоянного тока. Запрещается подавать на электроды напряжение обратной полярности или переменное напряжение.

Тиратрон с холодным катодом — прибор тлеющего разряда, где, кроме анода и катода, имеется один или два управляющих электрода (сетки). Назначение этих электродов — управлять моментом зажигания разряда. Управляющее действие сетки прекращается после зажигания тиратрона. Чтобы погасить разряд, необходимо уменьшить напряжение на аноде так, чтобы оно было ниже напряжения поддержания основного разряда. Конструктивно тиратроны тлеющего разряда выполняют в виде миниаторной микрэлектродной лампы со стеклянным баллоном и, как правило, гибкими выводами. Внутри баллона находится цилиндрический активированный катод и стержневой молибденовый анод. Вокруг анода имеется проволочное кольцо или цилиндр из никеля.



Рис. 8.4. Тиатрон с холодным катодом триодного типа:
а — устройство, б — характеристика зажигания (U_a от I_c), в — схема включения

Колба тиатрона заполняется неоном с небольшой добавкой аргона (рис. 8.4, а).

Чтобы уменьшить время запаздывания возникновения разряда, на управляющей сетке подается положительное напряжение, которое создает небольшую начальную ионизацию. Характеристика зажигания тиатрона триодного типа, т. е. зависимость напряжения на аноде U_a от тока в цепи управляющей сетки I_c , приведена на рис. 8.4, б. С ростом тока I_c напряжение анода, при котором происходит зажигание, уменьшается, так как при больших токах имеется большая начальная ионизация газа. Схема включения тиатрона триодного типа приведена на рис. 8.4, в. С помощью резистора R_c устанавливается ток несколько меньше необходимого для зажигания тиатрона. При подаче положительного импульса на сетку возрастает ток управления, что приводит к зажиганию тиатрона.

В тиатронах тетродного типа (рис. 8.5, а) вводится вспомогательная сетка C_1 рядом с катодом K . Назначение вспомогательной сетки — создавать вспомогательный разряд в тиатроне. Изменением потенциала второй сетки U_{c2} управляют зажиганием разряда. Характеристики зажигания тиатрона тетродного типа и схема включения приведены на рис. 8.5, б и в. Тиатроны тетродного разряда имеют высокую стабильность и

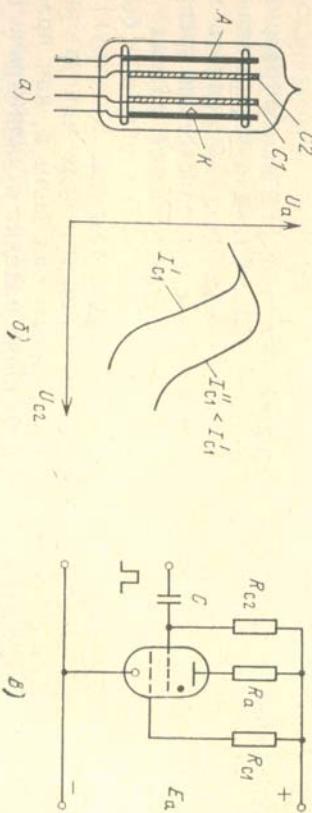


Рис. 8.5. Тиатрон с холодным катодом тетродного типа:
а — устройство, б — характеристика зажигания, в — схема включения

малый разброс параметров. В ряде случаев применяют активированные катоды, что снижает напряжение зажигания. Наличие инерционных процессов в газоразрядных приборах приводит к тому, что переход тиатрона из непроводящего состояния в проводящее и обратно осуществляется с некоторым запаздыванием.

Основные параметры тиатрона.

Время запаздывания возникновения разряда — интервал времени от момента приложения напряжения анод — катод и момента возникновения разряда.

Время восстановления электрической прочности — интервал времени, в течение которого тиатрон восстанавливает свои свойства после прекращения разряда.

Для наиболее быстродействующих тиатронов время восстановления составляет около 5 мкс.

Газоразрядные сигнальные индикаторы — это сигнальные люминесцентные лампы, представляющие собой газоразрядные приборы тлеющего разряда с нанесенным на внутренней поверхности стеклянного баллона слоем цветного люминофора (рис. 8.6). Лампа имеет два электрода — катод и анод — и наполнена инертным газом. Цвет свечения лампы зависит от сочетаний типа люминофора с родом газа, наполняющего лампу.

Линейные газоразрядные индикаторы (ЛГИ) применяют для фиксации непрерывных показаний, где не требуется иметь точные цифровые данные. Визуально информация отображается виде изменяющегося числа световых точек или длин линий в зависимости от приложенного напряжения. Выпускаются два вида ЛГИ: *аналоговые*, где свечение разряда имеет вид светящегося сплошного столба, высота которого изменяется в зависимости от уровня измеряемого электрического сигнала; *дискретные*, у которых свечение имеет вид отдельной точки или столбика, состоящего из группы точек.

В дискретных ЛГИ удаление световой точки от начала отсчета или высоты столбика пропорционально числу импульсов, поступающих на вход схемы управления. ЛГИ ИН-9 представляет



Рис. 8.6. Устройство (а) и схема включения (б) сигнальной люминесцентной лампы

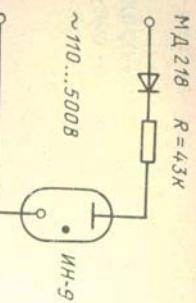


Рис. 8.7. Схема включения ИН-9

Линейные дискретные счетно-индикаторные приборы представляют собой индикаторную лампу с линейным расположением электродов, в которой используется принцип направленного переноса разряда. Конструктивно индикатор дискретного действия имеет экран с продольной щелью, внутри которого находится проволочный катод. Вдоль экрана расположен 101 анод, что определяет емкость счетчика. Все аноды, за исключением 1-го и 101-го, обединены внутри прибора в три группы. Индикация осуществляется по свечению в анодной области у штыревого анода в виде светящейся точки. Под действием импульсов, поступающих на вход схемы управления, светящийся разряд перемещается вдоль линейного катода. К ЛДИ дискретного действия относятся приборы ИН-20, ИН-26.

ЗНАКОВЫЕ ИНДИКАТОРЫ

Знаковые индикаторы — это приборы тлеющего разряда, которые служат для визуальной цифровой, буквенной и другой знаковой информации электрических сигналов. Представляют собой прибор, в котором имеется 10 катодов, выполненных в форме цифр или соответствующих знаков из тонкой никромовой проволоки, и

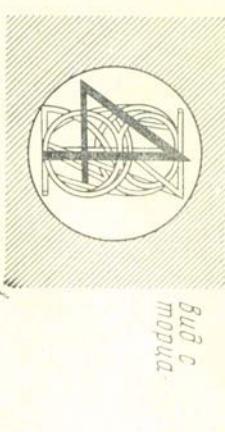
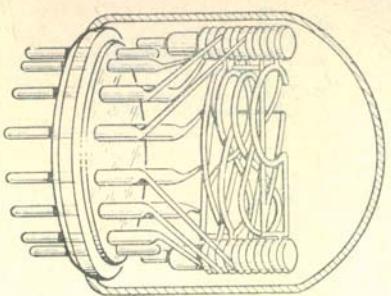


Рис. 8.8. Знаковые индикаторы

собой круглую стеклянную колбу с длинным цилиндрическим катодом и анодом, катод расположен внутри анода вдоль его оси и изготовлен из молибденовой проволоки. Свечение наблюдается сквозь прорези в аноде, которые сделаны по всей его длине. Схема включения ИН-9 приведена на рис. 8.7.

В приборе ИН-13 имеется вспомогательный электрод, с помощью которого устанавливается начальное положение разряда.

Линейные дискретные счетно-индикаторные приборы представляют собой индикаторную лампу с линейным расположением электродов, в которой используется принцип направленного переноса разряда. Конструктивно индикатор дискретного действия имеет экран с продольной щелью, внутри которого находится проволочный катод. Вдоль экрана расположен 101 анод, что определяет емкость счетчика. Все аноды, за исключением 1-го и 101-го, обединены внутри прибора в три группы. Индикация осуществляется по свечению в анодной области у штыревого анода в виде светящейся точки. Под действием импульсов, поступающих на вход схемы управления, светящийся разряд перемещается вдоль линейного катода. К ЛДИ дискретного действия относятся приборы ИН-20, ИН-26.

МАРКИРОВКА

Обозначение начинается с сочетания букв или одной буквы, соответствующей типу прибора, например:
 ГХ — газоразрядный тлеющий разряд (с холодным катодом);
 ТХ — тиатрон тлеющего разряда;
 ТХИ — тиатроны тлеющего разряда импульсные;
 ТР — тиатроны с накаленным катодом, наполненные парами ртути;
 ТГИ — тиатроны с газовым наполнением, импульсные;
 СГ — стабилитроны;
 ИН — индикаторы тлеющего разряда;
 ИГПП — газоразрядные индикаторные панели постоянного тока;
 ИГПВ — газоразрядные индикаторные панели переменного тока.

После букв ставится порядковый номер прибора. Третий элемент обозначения в разных типах приборов различен, часто он характеризует конструктивное оформление прибора (П — миниатюрные, Б или Г — сверхминиатюрные, К — в керамической оболочке).

Выводы. 1. Ионные приборы используют электрические разряды в газе. В зависимости от степени ионизации газа, приложенного напряжения или протекающего через прибор тока различают следующие основные виды разрядов: тихий или темный;

тлеющий (в стабилизаторах напряжения, индикаторных лампах, тиатронах с холодным катодом), дуговой (в мощных выпрямительных устройствах: газотронах, тиатронах, ртутных вентилях).
2. В настоящее время наибольшее применение получили приборы тлеющего разряда, используемые для индикации электрических величин и в импульсных устройствах.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите виды разряда в газах.
2. Какова характерная особенность коронного и нормального тлеющего разрядов?
3. В каких приборах используют коронный и нормальный тлеющий разряд?
4. Укажите особенности дугового разряда, в каких приборах он используется?
5. Какое действие оказывает управляющая сетка в тиатроне?
6. Назначение линейных газоразрядных приборов.

ГЛАВА 9. ФОТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ

Часть

9.1. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ФОТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В современной технике, в частности в аппаратуре связи, широкое применение получили фотоэлектронные приборы, преобразующие световую энергию в электрическую, световое излучение в электрический ток. Основные законы фотоэффекта открыты выдающимся русским физиком А. Г. Столетовым в 1888 г.

Фотоэлектронные приборы делятся на две основные группы: 1) полупроводниковые приборы, в которых под действием энергии света создаются пары подвижных носителей заряда — электропоны проводимости и дырки, эти приборы называют приборами с *внутренним фотоэффектом*; 2) приборы, в которых под действием энергии света возникает фотоэлектронная эмиссия, называют приборами с *внешним фотоэффектом*.

Свет представляет собой поток электромагнитной энергии. Обладая как волновой, так и корпускулярной природой, свет излучается или поглощается веществом только в виде дискретных количеств энергии — фотонов или квантов. Энергия кванта ε пропорциональна частоте электромагнитной волны излучения v , т. е. $\varepsilon = h\nu$, где h — постоянная Планка. Для видимого диапазона час-

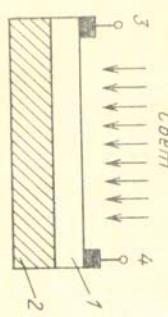
тот света энергия кванта изменяется в пределах 3,25...1,6 эВ. Каждому цвету света соответствует своя частота. Световой поток — мощность электромагнитной энергии, которая вызывает зрительное ощущение. Световой поток измеряется в люменах (лм). При воздействии светового потока на полупроводник электроны валентной зоны получают дополнительную энергию. Если энергия кванта равна энергии для перевода электрона из валентной зоны в зону проводимости или больше ее, возникает генерация пары электрон — дырка проводимости, вследствие чего проводимость полупроводника увеличивается.

Электрическая проводимость, возникающая под действием светового потока, называется *фотопроводимостью*.

ФОТОРЕЗИСТОРЫ

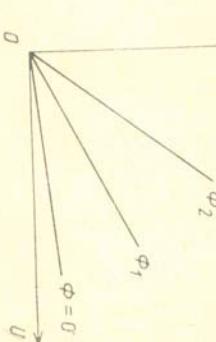
Фоторезистор — полупроводниковый прибор, у которого под действием светового потока меняется электрическое сопротивление. Основным элементом конструкции фоторезистора является слой полупроводника, на который попадает световой поток (рис. 9.1). Для создания фоторезисторов используют сернистый свинец, сернистый кадмий, селенид свинца, селенид кадмия. Светочувствительный полупроводниковый слой 1 наносят на изолированную подложку 2 из стекла, слюды или керамики, и к нему подключают два металлических вывода 3 и 4. Фоторезистор помещается в корпус с отверстием для попадания света на светочувствительный слой. Под воздействием световой энергии проводимость светочувствительного полупроводникового слоя увеличивается. Для получения тока фоторезистор включается в цепь источника ЭДС. В отсутствие освещения в этой цепи протекает незначительный ток, обусловленный собственной проводимостью полупроводника, который называется темновым током, при освещении появляется фототок.

Вольт-амперная характеристика фоторезистора представляет собой зависимость $I = j(U)$ (при $\Phi = \text{const}$, где Φ — световой поток) (рис. 9.2). Чем больше Φ , тем круче проходит характеристика, так как с увеличением Φ образуется больше носителей заряда и увеличивается проводимость. Эти характеристики линейны в



ФОТОПРОВОДИМОСТЬ

Л, мкА



0

Рис. 9.1. Устройство фоторезистора

Рис. 9.2. Вольт-амперная характеристика фоторезистора

пределах допустимой мощности рассеяния. С увеличением тока выше допустимого выделяется такое количество тепла, которое может привести к разрушению светочувствительного слоя. В отсутствие освещения в цепи фотодиода имеется небольшой темновой ток I_t .

Световая характеристика фотодиода — это зависимость $I = f(\Phi)$ при $U = \text{const}$ (рис. 9.3). Характеристика имеет плавный характер, так как пару с процессом генерации под воздей-ствием светового потока, происходит и обратный процесс — рекомбинация. При этом, чем больше Φ и больше свободных носителей, тем больше вероятность рекомбинации, поэтому крутизна световой характеристики уменьшается.

Основным параметром фотодиода является чувствительность. Различают *чувствительность интегральную*, т. е. к белому свету, и *спектральную* — к свету определенного цвета. Чувствительность характеризует изменение фототока в цепи фотодиода при изменении светового потока на один люмен: $K_\Phi = \Delta I / \Delta \Phi$ при $U = \text{const}$. Интегральная чувствительность фотодиодов составляет единицы ампер на люмен. Спектральная чувствительность фотодиода характеризуется изменением фототока при изменении светового потока на 1 лм только для определенной длины волн светового потока. Спектральная чувствительность фотодиода зависит от состава светочувствительного слоя. Каждый фотодиод характеризуется своей спектральной чувствительностью, т. е. зависимостью чувствительности от длины волн света каждого фотодиода имеют свои максимумы и минимумы спектральной чувствительности.

К параметрам фотодиодов относятся темновой ток I_t и темновое сопротивление R_t . Основным недостатком фотодиодов является их сравнительно большая инерционность, которая обусловлена относительно большим временем жизни генерируемых пар носителей заряда при освещении.

Фотодиоды применяют в схемах автоматики, особенно в схемах защиты и автоматического управления, т. е. в устройствах, где можно пренебречь их инерционностью и нелинейностью световой характеристики, но где требуется высокая чувствительность фотодиода.

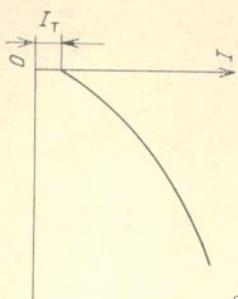


Рис. 9.3. Световая характеристика фотодиода

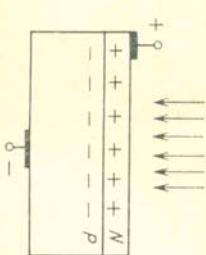


Рис. 9.4. Устройство фотодиода

ФОТОДИОДЫ

Фотодиод представляет собой полупроводниковый прибор с одним переходом. Конструктивно фотодиод выполняется так, чтобы его PN -переход был открыт для света при сохранении герметичности корпуса. Структура фотодиода изображена на рис. 9.4. Под воздействием светового потока с достаточной энергией квантов происходит генерация с образованием пар электрон-протонов — дырка проводимости, которые диффундируют к границе PN -перехода. Фотодиоды работают при обратном напряжении, поэтому в PN -переходе создается тормозящее поле для неосновных носителей и ускоряющее поле для неосновных носителей заряда. Неосновные носители, образуя фототок, переходят через PN -переход в соседнюю область. Таким образом, ток фотодиода обусловлен дрейфом неосновных носителей. Чем больше световой поток, тем интенсивнее происходит генерация, все большие неосновные носители переходят через PN -переход, и фототок увеличивается.

Фотодиоды создают на основе герmania и кремния. *Вольт-амперная характеристика* фотодиода представляет собой зависимость $I = f(U)$ при $\Phi = \text{const}$ (рис. 9.5). В отсутствие освещения в цепи фотодиода протекает очень незначительный темновой ток I_t . У германниевых фотодиодов он составляет 10...30 мА, у кремниевых — 2...3 мА.

Темновой ток — это обычный тепловой ток неосновных носителей PN -перехода. При постоянном световом потоке Φ и изменении $U_{\text{обр}}$ фототок почти не меняется, так как практически все неосновные носители заряда, находящиеся в пределах диффузионной длины от PN -перехода, перебрасываются из одной области в другую. При изменении светового потока Φ характеристики смешиваются на величину $\Delta I'$, пропорциональную изменению светового потока. Из вольт-амперной характеристики фотодиода видно, что внутреннее сопротивление фотодиода $R_i = U_{\text{обр}} / \Delta I$ при $\Phi = \text{const}$ очень велико, так как большим изменениям $U_{\text{обр}}$ соответствуют очень маленькие изменения $\Delta I'$. Оно составляет единицы метров.



Рис. 9.5. Вольт-амперные характеристики фотодиода

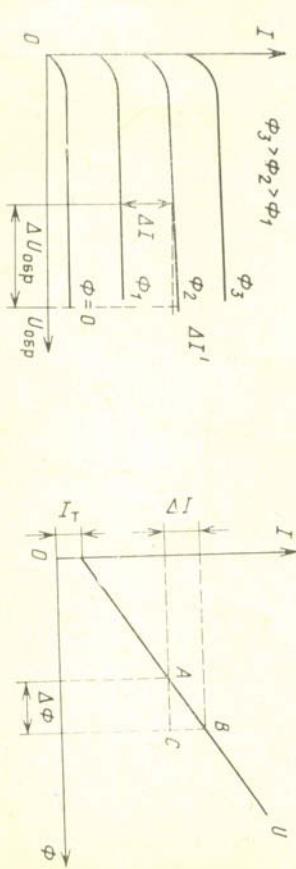


Рис. 9.6. Световая характеристика фотодиода

При подаче $U_{\text{обр}}$ выше допустимого происходит тепловой пробой и диод выходит из строя за счет лавинного размножения зарядов.

Световая характеристика фотодиода отражает зависимость тока в диоде от изменения светового потока при постоянном напряжении источника, т. е. $I = f(\Phi)$ при $U_{\text{обр}} = \text{const}$ (рис. 9.6). Эта характеристика линейна, что является большим достоинством фотодиода, так как он позволяет производить пропорциональное преобразование светового потока в электрический ток без искажения характера изменения светового потока. Линейность световой характеристики объясняется тем, что при освещении фотодиода и подаче обратного напряжения ток в диоде меняется пропорционально изменению светового потока, благодаря полному переходу неосновных носителей заряда из одной области в другую. Однако при очень больших световых потоках линейность может нарушаться, так как возникает очень большая концентрация носителей заряда, уменьшается время их жизни, увеличивается скорость рекомбинации.

Интегральная чувствительность фотодиода определяется как изменение тока диода (в мА) при изменении светового потока на 1 лм: $K_{\Phi} = \Delta I / \Delta \Phi$ (см. рис. 9.6). Интегральная чувствительность фотодиодов составляет десятки миллиампер на люмен. Чувствительность фотодиода можно определить по световой характеристике.

Спектральная характеристика фотодиода зависит от материала, из которого он изготовлен. Для генерации пары электрон — дырка проводимости энергия фотона должна быть больше ширины запрещенной зоны ΔW ; $h\nu \geq \Delta W$, где ν — частота света. Поэтому для каждого полупроводника существует своя область спектра светового излучения, которая может создать фототок. При подаче на фотодиод световых прямоугольных импульсов с крутым фронтом нарастания и спада начинает сказываться его инерционность. Это приводит к запаздыванию изменения фототока при изменении светового потока.

Причины инерционности — емкость PN -перехода, которая не может мгновенно зарядиться и разрядиться, и конечное время диффузии неосновных носителей заряда к переходу. На работу и параметры фотодиода оказывают влияние изменения температуры. При увеличении температуры возрастает темновой ток, так как электроны валентной зоны получают дополнительную энергию для перехода в зону проводимости, что приводит к увеличению тока неосновных носителей в отсутствие освещения. Особенно заметно возрастает темновой ток в германьевых фотодиодах.

Рассмотрим разновидности фотодиодов.

Фотодиоды с PIN -структурой. Эти диоды созданы для расширения частотного диапазона фотодиода без снижения его чувствительности. Напомним, что в этих диодах между P - и N -областями находится область собственной проводимости I . Так как область I создается достаточно широкой, то уменьшаются барьерная емкость PN -перехода и время заряда этой емкости. Кроме того, ес-

ли в обычных фотодиодах происходит перемещение носителей заряда к границе PN -областей в результате диффузии, то в PIN -диодах основная генерация возникает в I -области, в которой сопротивление в $10^6 \dots 10^7$ раз больше, чем в P - и N -областях, и поэтому обратное напряжение создает сильное электрическое поле в этой области. При этом в области I возникает большая напряженность электрического поля E , скорость перемещения зарядов увеличивается, а время пролета носителей заряда соответственно уменьшится.

Следовательно, в PIN -фотодиоде перемещение носителей заряда к границе PN -областей происходит за счет дрейфа в сильном электрическом поле. Таким образом, в PIN -фотодиоде барьерная емкость и время пролета носителей зарядов меньше, чем в обычном фотодиоде. Для кремниевых PIN -диодов максимальная частота управления достигает 1 Гц.

Фотодиоды Шотки. Напомним, что такие диоды образуются на основе структуры металл — полупроводник. Для получения фототока в диодах Шотки структура освещается, а на диод подается обратное напряжение, как в обычных фотодиодах. При этом электроны металла, получив дополнительную энергию за счет освещения, могут преодолеть потенциальный барьер и перейти в полупроводник, если энергия кванта больше энергии поля, создаваемого потенциальным барьером. Благодаря сказанному, ток фотодиода возникает на более длинноволновом участке света, так как требуется энергия меньшая, чем ширина запрещенной зоны полуправодника и, следовательно, спектральная характеристика фотодиодов Шотки значительно шире, чем у обычных фотодиодов из того же полупроводника. Кроме того, как известно, диоды Шотки характеризуются очень большим быстродействием за счет минимальной барьерной емкости и малого пролета носителей заряда.

Вентильные фотодиоды. Отличительной особенностью фотодиода является его способность прямого преобразования энергии света в электрическую энергию. Эта способность фотодиодов реализуется в специальных устройствах, которые иногда называют *солнечными батареями*. Рассмотрим принцип действия фотопреобразователей световой энергии в электрическую.

Как уже указывалось, под действием света в фотодиодах происходит генерация пары электрон — дырка проводимости. Эти носители заряда диффундируют в сторону PN -перехода. Как известно, даже в отсутствие внешнего напряжения, как это имеет место в данном случае, на границе P - и N -областей образуется потенциальный барьер. Электрическое поле, созданное при этом, является ускоряющим для неосновных носителей заряда. В результате электроны из P -области перейдут в N -область, а дырки из N -области в P -область, что приведет к накапливанию избыточных электронов в N -области и избыточных дырок в P -области (рис. 9.7). Избыточные носители создают электрическое поле, которое зарядит область P положительно, а область N от-

риательно. Благодаря этому, между выводами *P*- и *N*-областей устанавливается разность потенциалов, называемая фото-ЭДС. Если замкнуть *PN*-переход, то при освещении в цепи потечет ток, направление которого совпадает с направлением тока неосновных носителей заряда, т. е. фототок течет в том же направлении, что и обратный ток *PN*-перехода при подаче внешнего обратного напряжения.

Исходным материалом для изготовления солнечных батарей является кремний: КПД кремниевых батарей составляет 8...10%. Кремниевые солнечные батареи, в которых множество отдельных элементов соединяется как последовательно, так и параллельно, успешно работают на космических кораблях, орбитальных станциях, искусственных спутниках Земли, а также в наземных условиях, где затруднена доставка электрической энергии и имеется достаточный уровень солнечного освещения. В этом случае солнечные батареи могут использоваться для питания радиоприемников, телевизионных приемников, промежуточных устройств телефонных и телеграфных линий. В большинстве случаев солнечные батареи используются совместно с аккумуляторными батареями. В дневное время аккумуляторы заряжаются от солнечных батарей, а в ночное время питают аппаратуру.

ФОТОТРАНЗИСТОРЫ

При создании фототранзисторов ставится задача получить за счет усиления фототока гораздо большую чувствительность, чем у фотодиода. Фототранзистор представляет собой фотоэлектрический полупроводниковый прибор, у которого имеется два перехода, как и в обычном биполярном транзисторе (рис. 9.8). Световой поток падает на базу. В электрическую цепь фототранзистор включается по схеме с ОЭ. Один из возможных вариантов включения — с разомкнутой базой. При таком включении напряжение *U_{кэ}*, несмотря на то, что база обрвана, распределяется между

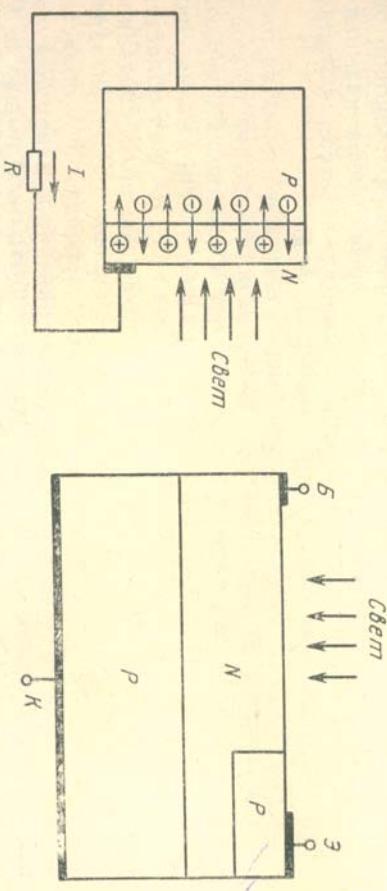


Рис. 9.7. Вентильный фотодиод

обоими переходами пропорционально их сопротивлению. На коллекторный переход оно подается как обратное, на эмиттерный — как прямое. Большая часть этого напряжения оказывается приложенной к коллекторному переходу и только очень малая часть — к эмиттерному. Поэтому потенциальный барьер на эмиттерном *PN*-переходе скомпенсирован только частично. В отсутствие освещения в замкнутой цепи транзистора течет темновой ток *I_т*, который представляет собой сквозной начальный ток транзистора при *I_б*=0. При освещении базы происходит генерация носителей заряда за счет энергии светового потока. Эти носители заряда — дырки — идут к коллекторному переходу и затем под действием обратного напряжения этого перехода попадают на коллектор. Основные носители заряда в базе — электроны — перемещаются к эмиттерному переходу. Эти электроны, накапливаясь на границе с эмиттером, компенсируют положительный заряд, который создает электрическое поле потенциального барьера, что приводит к его снижению. Это вызывает дополнительную инъекцию основных носителей — дырок — из эмиттера в базу, где они становятся неосновными носителями и за счет обратного напряжения коллекторного перехода идут в коллектор. Часть дырок рекомбинирует в базе. Таким образом, в фототранзисторе управление производится с помощью светового потока, благодаря которому создаются избыточные носители заряда, что приводит к частичной компенсации потенциального барьера в эмиттерном переходе. В фототранзисторе фототок усиливается, как и в обычном транзисторе в схеме с ОЭ, в h_{210} раз.

Статические выходные характеристики фототранзистора $I_{\text{к}} = f(\Phi)$ при $\Phi = \text{const}$ (рис. 9.9) по существу аналогичны выходным характеристикам биполярного транзистора в схеме с ОЭ. Наклон этих характеристик больше, чем у фотодиода, а, следовательно, выходное сопротивление фототранзистора получается меньшее, чем сопротивление фотодиода. Темновой ток фототранзистора больше, чем у фотодиода, так как ток, который возникает в базе транзистора, усиливается в h_{210} раз. *Световая характеристика фототранзистора* — $I_{\text{к}} = f(\Phi)$ при $U_{\text{кэ}} = \text{const}$. С увеличением светового потока Φ ток *I_к* возрастает. Чем больше *U_{кэ}*, тем больше ток *I_к* при том же световом потоке. *Интервалная чувствительность* фототранзистора ($\Delta U_{\text{кэ}}$) $K_{\Phi} = \Delta I_{\text{к}} / \Delta \Phi$ при $U_{\text{кэ}} = \text{const}$. *K_Ф* у фототранзистора примерно в h_{210} раз больше, чем у фотодиода, и составляет 0,5...1 А/лм. Схема с разомкнутой ба-

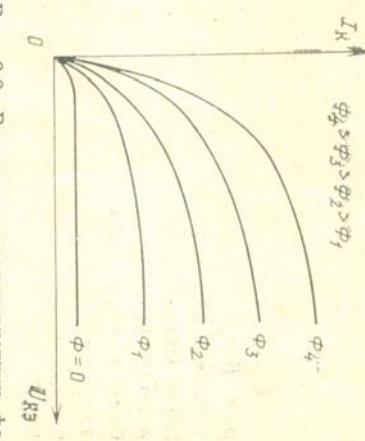


Рис. 9.9. Выходные характеристики фототранзистора

зой имеет сравнительно низкую термостабильность, так как с увеличением температуры сквозной ток транзистора резко увеличивается.

В настоящее время выпускают фототранзисторы с выводом базы. Благодаря этому на переход эмиттер — база подается дополнительное смещение для получения более линейной световой характеристики, а также для компенсации температурных изменений токов.

Наряду с биполярными созданы фототранзисторы на основе МДП-структур. В таких транзисторах освещение канала производится через прозрачный затвор. Под действием света происходит генерация в подзатворной области, и канал обогащается. При подаче постоянных напряжений на электроды транзистора в цепи стока появляется ток I_C , пропорциональный световому потоку Φ .

ФОТОТИРИСТОРЫ

Фототиристор представляет собой такую же четырехслойную структуру $PNPN$, как и обычный тиристор. К структуре приложено прямое напряжение. Одна из баз фототиристора получает возможность освещения. Назначение фототиристоров — создание переключающего устройства, которое управляет световым лучом. В отсутствие освещения фототиристор закрыт, и в его цепи протекает очень маленький темновой обратный ток. При освещении, как и в других фотоприборах, рассмотренных ранее, возникает генерация, которая приводит к компенсации обратного напряжения на среднем PN -переходе и увеличению суммарного коэффициента передачи по току. В результате происходит переключение триистора из закрытого состояния в открытое. Семейство вольтамперных характеристик фототиристора аналогично характеристикам триистора, где роль управляющего напряжения выполняет световой поток.

Фототиристоры применяют для переключения больших мощностей в электрических цепях.

СВЕТОЛИОДЫ

Светодиоды принадлежат к классу светоизлучающих приборов. В них электрический ток преобразуется в видимый свет — оптическое излучение. Преобразование электрического тока в свет происходит также и в обычных лампах накаливания. Однако для использования этого явления в электронных приборах, где требуется управляемое преобразование, лампы накаливания не годятся вследствие своих недостатков: очень большая инерционность, отсутствие направленности оптического излучения, низкий КПД.

В светодиодах преобразование электрической энергии в световую происходит при обычной температуре за счет свойств PN -перехода. В основе явления свечения фотодиода лежит явление люминесценции. Продесс люминесценции включает в себя два этапа. На первом этапе происходит генерация подвижных носителей заряда, накопление энергии; на втором этапе возникает рекомбинация, в результате которой в окружающее пространство излучается энергия, затраченная на генерацию. Для того чтобы излученная электромагнитная энергия имела спектральный состав в области видимого света, требуется подобрать соответствующий материал излучающих структур. При рекомбинации выделяется световая энергия, равная энергии запрещенной зоны $\Delta W = hc/\lambda$, а $\lambda = hc/\Delta W$. (Напомним, что h — постоянная Планка, а c — скорость света.) Очевидно, что чем шире запрещенная зона, тем короче λ . Германий и кремний имеют недостаточную ширину запрещенной зоны для получения видимого света, и их излучение лежит в области инфракрасного света, хотя следует отметить, что диоды инфракрасного излучения также получили широкое распространение.

Для получения излучения в области видимого света используют материалы с большой шириной запрещенной зоны — фосфорид галлия, карбид кремния, арсенид галлия и другие.

В светодиодах применяют инжекционную люминесценцию, при которой PN -переход находится под прямым напряжением, в результате чего происходит инжекция основных носителей из одной области в другую. В светодиодах излучающей является только одна область, поэтому стремится получить максимальную инжекцию в эту область. Если излучающей является P -область, то концентрация примеси в N -области должна быть гораздо выше, чем в излучающей P -области. Это приводит к практическим односторонней инжекции из N -области в P -область. В P -области происходит рекомбинация инжектированных носителей с выделением в окружающее пространство электромагнитного излучения видимого света.

Достоинства светодиодов: высокий КПД преобразования электрической энергии в световую, сравнительно высокая направленность излучения; высокое быстродействие, что позволяет использовать светодиоды в устройствах управления.

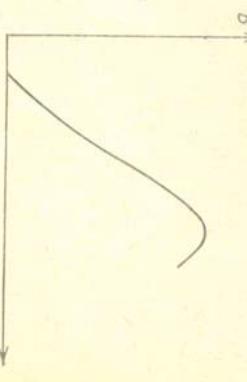


Рис. 9.10. Излучательная характеристика светодиода