

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ

§ 1.1. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В *p-n*-ПЕРЕХОДЕ

Основным элементом большинства полупроводниковых приборов является электронно-дырочный переход (*p-n*-переход), представляющий собой переходный слой между двумя областями полупроводника, одна из которых имеет электронную электропроводность, другая — дырочную.

Разность потенциалов φ_k в переходе, обусловленную градиентом концентрации носителей заряда, называют контактной разностью потенциалов:

$$\varphi_k = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2} = \frac{kT}{e} \ln \frac{p_p}{p_n}, \quad (1.1)$$

где k — постоянная Больцмана; e — заряд электрона; T — температура; N_a и N_d — концентрации акцепторов и доноров в дырочной и электронной областях соответственно; p_p и p_n — концентрации дырок в *p*- и *n*-областях соответственно; n_i — собственная концентрация.

Обычно контактная разность потенциалов имеет порядок десятых долей вольт.

Толщину несимметричного резкого *p-n*-перехода рассчитывают по формуле

$$\Delta = \sqrt{\frac{2\varphi_k \varepsilon \varepsilon_0}{e} \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right)}, \quad (1.2)$$

где ε — относительная диэлектрическая проницаемость материала полупроводника; ε_0 — диэлектрическая постоянная свободного пространства.

Толщина электронно-дырочных переходов имеет порядок от сотых долей до единиц микрометров.

Полупроводниковый прибор с *p-n*-переходом, имеющий два омических вывода, называют полупроводниковым диодом (рис. 1.1). Одна из областей *p-n*-структуры (p^+), называемая эмиттером, имеет большую концентрацию основных носителей заряда, чем другая область, называемая базой.

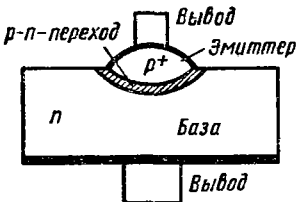


Рис. 1.1

Статистическая вольт-амперная характеристика (ВАХ) полупроводникового диода изображена на рис. 1.2. Здесь же пунктиром показана теоретическая ВАХ электронно-дырочного перехода, определяемая соотношением

$$I = I_0 (e^{U/(m\varphi_T)} - 1), \quad (1.3)$$

где I_0 — обратный ток насыщения (ток экстракции, обусловленный неосновными носителями заряда; значение его очень мало); U — напряжение на $p-n$ -переходе; $\varphi_T = kT/e$ — температурный потенциал (k — постоянная Больцмана, T — температура, e — заряд электрона); m — поправочный коэффициент: $m = 1$ для германиевых $p-n$ -переходов и $m = 2$ для кремниевых $p-n$ -переходов при малом токе.

Кремниевые диоды имеют существенно меньшее значение обратного тока по сравнению с германиевыми вследствие более низкой концентрации неосновных носителей заряда. Обратная ветвь ВАХ у кремниевых диодов при данном масштабе практически сливается с осью абсцисс. Прямая ветвь ВАХ у кремниевых диодов расположена значительно правее, чем у германиевых.

Влияние температуры на вольт-амперные характеристики. На вольт-амперные характеристики диода оказывает существенное влияние температура окружающей среды. При увеличении температуры обратный ток насыщения увеличивается примерно в 2 раза у германиевых и в 2,5 раза у кремниевых диодов на каждые 10°C . Для германиевых диодов

$$I_0(T) = I_{01} \cdot 2^{(T - T_1)/10}, \quad (1.4)$$

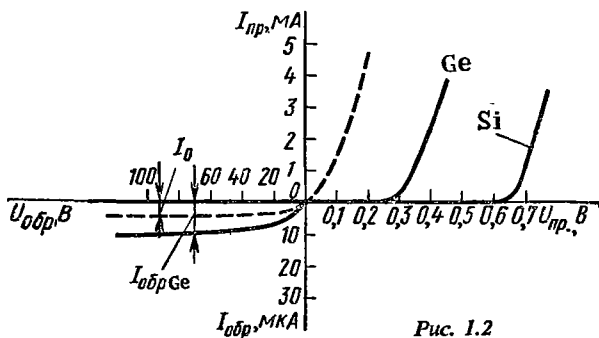


Рис. 1.2

где ток I_{01} измерен при температуре T_1 .

Если через германиевый диод протекает постоянный ток, при изменении температуры падение напряжения на диоде изменяется приблизительно на $2,5 \text{ мВ}/^\circ\text{С}$:

$$dU/dT \approx -2,5 \text{ мВ}/^\circ\text{С}. \quad (1.5)$$

Для диодов в интегральном исполнении dU/dT составляет от $-1,5 \text{ мВ}/^\circ\text{С}$ в нормальном режиме до $-2 \text{ мВ}/^\circ\text{С}$ в режиме микротоков.

Максимально допустимое увеличение обратного тока диода определяет максимально допустимую температуру диода, которая составляет $80-100^\circ\text{С}$ для германиевых диодов и $150-200^\circ\text{С}$ для кремниевых.

Минимально допустимая температура диода лежит в пределах $-(60 \div 70)^\circ\text{С}$.

Дифференциальным сопротивлением диода называют отношение приращения напряжения на диоде к вызванному им приращению тока:

$$r_{\text{диф}} = dU/dI. \quad (1.6)$$

Из выражения (1.3) следует, что

$$r_{\text{диф}} \approx \varphi_T/I. \quad (1.7)$$

Пробой диода. При обратном напряжении диода выше определенного критического значения наблюдается резкий рост обратного тока (рис. 1.3). Это явление называют пробоем диода. Пробой диода возникает либо в результате воздействия сильного электрического поля в p - n -переходе (рис. 1.3, кривая a) (электрический пробой может быть туннельным или лавинным), либо в результате разогрева перехода при протекании тока большого значения и при недостаточном теплоотводе, не обеспечивающем устойчивость теплового режима перехода (рис. 1.3, кривая b) (тепловой пробой). Электрический пробой обратим, т. е. он не приводит к повреждению диода, и при снижении обратного напряжения свойства диода сохраняются. Тепловой пробой является необратимым. Нормальная работа диода в качестве элемента с односторонней проводимостью возможна лишь в режимах, когда обратное напряжение не превышает пробивного значения. Возможность теплового пробоя диода учитывает-

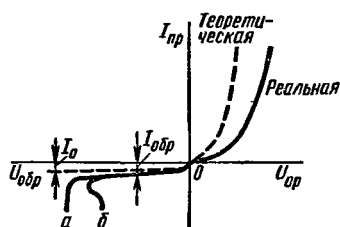


Рис. 1.3

ся указанием в паспорте на прибор допустимого обратного напряжения $U_{\text{обратн}}$ и температурного диапазона работы. Напряжение пробоя зависит от типа диода и температуры окружающей среды.

Значение допустимого обратного напряжения устанавливается с учетом исключения возможности электрического пробоя и составляет $(0,5 \div 0,8) U_{\text{проб}}$.

Емкости диода. Принято говорить об общей емкости диода C_d , измеренной между выводами диода при заданных напряжении смещения и частоте. Общая емкость диода равна сумме барьерной емкости C_b , диффузионной емкости $C_{\text{диф}}$ и емкости корпуса прибора C_k .

Барьерная (зарядная) емкость обусловлена нескомпенсированным объемным зарядом, сосредоточенным по обе стороны от границы p - n -перехода.

Барьерная емкость равна отношению приращения заряда на p - n -переходе к вызвавшему его приращению напряжения:

$$C_b = \frac{dQ}{dU} = \Pi \sqrt{\frac{\epsilon \epsilon N_d}{2(\varphi_k + U)}}, \quad (1.8)$$

где ϵ — диэлектрическая проницаемость полупроводникового материала; Π — площадь p - n -перехода.

Из формулы (1.8) следует, что барьерная емкость зависит от площади перехода Π , напряжения на переходе U , а также от концентрации примесей. Модельным аналогом барьерной емкости может служить емкость плоского конденсатора, обкладками которого являются p - и n -области, а диэлектриком служит p - n -переход, практически не имеющий подвижных зарядов. Значение барьерной емкости колеблется от десятков до сотен пикофарад; изменение этой емкости при изменении напряжения может достигать десятикратной величины.

Диффузионная емкость. Изменение величины объемного заряда неравновесных электронов и дырок, вызванное изменением прямого напряжения, можно рассматривать как следствие

наличия так называемой диффузионной емкости, которая включена параллельно барьерной емкости.

Диффузионная емкость

$$C_{\text{диф}} \cong \frac{e}{kT} I_{\text{пр}} \tau, \quad (1.9)$$

где τ — время жизни носителей заряда; $I_{\text{пр}}$ — прямой ток.

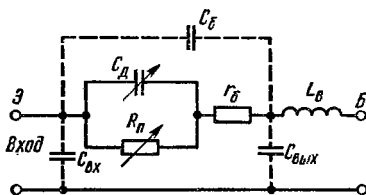


Рис. 1.4

Значения диффузионной емкости могут иметь порядок от сотен до тысяч пикофарад. Поэтому при прямом напряжении емкость p - n -перехода определяется преимущественно диффузионной емкостью, а при обратном напряжении — барьерной емкостью.

Схема замещения полупроводникового диода изображена на рис. 1.4. Здесь C_d — общая емкость диода, зависящая от режима; R_n — сопротивление перехода, значение которого определяют с помощью статической ВАХ диода ($R_n = U/I$); r_b — распределенное электрическое сопротивление базы диода, его электродов и выводов.

Иногда схему замещения дополняют емкостью между выводами диода C_b , емкостями $C_{вх}$ и $C_{вых}$ (показаны пунктиром) и индуктивностью выводов L_b .

§ 1.2. ТИПЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ

Выпрямительные диоды используют для выпрямления переменных токов частотой 50 Гц — 100 кГц. Основные параметры выпрямительных диодов даются применительно к их работе в однополупериодном выпрямителе с активной нагрузкой (без конденсатора, сглаживающего пульсации).

Среднее прямое напряжение $U_{пр.ср}$ — среднее за период прямое напряжение на диоде при протекании через него максимально допустимого выпрямленного тока.

Средний обратный ток $I_{обр.ср}$ — средний за период обратный ток, измеряемый при максимальном обратном напряжении.

Максимально допустимое обратное напряжение $U_{обр.мах}$ ($U_{обр.имах}$) — наибольшее постоянное (или импульсное) обратное напряжение, при котором диод может длительно и надежно работать.

Максимально допустимый выпрямленный ток $I_{вл.ср.мах}$ — средний за период ток через диод (постоянная составляющая), при котором обеспечивается его надежная длительная работа.

Превышение максимально допустимых величин $U_{обр.мах}$, $U_{обр.имах}$, $I_{вл.ср.мах}$ ведет к резкому сокращению срока службы или пробою диода.

Максимальная частота $f_{мах}$ — наибольшая частота подводимого напряжения, при которой выпрямитель на данном диоде работает достаточно эффективно, а нагрев диода не превышает допустимой величины.

Высокочастотные (универсальные) и импульсные диоды применяют для выпрямления токов, модуляции и детектирования сигналов с частотами до нескольких сотен мегагерц. Импульсные диоды используют в качестве