

1.13. ЕМКОСТЬ $p-n$ -ПЕРЕХОДА

Цель лекции: ознакомление с понятием емкости $p-n$ -перехода, механизмами пробоя, биполярными транзисторами и гетероструктурами.

1.13.1. БАРЬЕРНАЯ И ДИФFUЗИОННАЯ ЕМКОСТЬ $p-n$ -ПЕРЕХОДА

Значения объемных зарядов в $p-n$ -переходе изменяются в зависимости от прикладываемого обратного напряжения U вследствие изменения толщины обедненного слоя. Следовательно, $p-n$ -переход обладает электрической емкостью.

Барьерная емкость (зарядовая) $p-n$ -перехода

$$C_{\text{бар}} = \frac{dQ_{\text{об}}}{dU} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_n S}{d(U)},$$

где $Q_{\text{об}}$ — заряд обедненного слоя $p-n$ -перехода; ϵ_0 — диэлектрическая постоянная; ϵ_n — относительная диэлектрическая проницаемость кристалла полупроводника n -типа; S — площадь $p-n$ -перехода.

Барьерная емкость совпадает с емкостью плоского конденсатора, расстояние между обкладками которого равно толщине обедненного слоя, с ростом обратного смещения уменьшается вследствие увеличения $d(U)$. У $p-n$ -переходов с большей концентрацией примеси барьерная емкость больше.

Вольт-фарадная характеристика (ВФХ) $C_{\text{бар}} = f(U)$ (рис. 1.40) имеет достаточно сложный вид, поэтому применяют аппроксимацию:

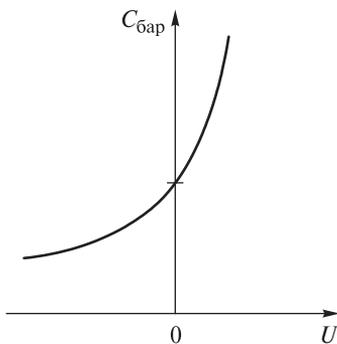


Рис. 1.40. Зависимость барьерной емкости от напряжения

$$C_{\text{бар}} = \frac{C_{\text{бар}(0)}}{(1 - U/U_{\text{к}})^m},$$

где $m = 0,3 \dots 0,5$; $U_{\text{к}}$ — контактная разность потенциалов.

Барьерная емкость слабо возрастает с увеличением температуры за счет $U_{\text{к}}$. Температурный коэффициент емкости уменьшается с ростом обратного напряжения.

При прямом смещении происходит инжекция неосновных носителей в p - и n -областях. При изменении прикладываемого напряжения изменяется и концентрация инжектированных носителей, а следовательно, и заряды областей,

что можно рассматривать как действие емкости. Так как эта емкость появляется за счет диффузионной составляющей тока, то ее называют диффузионной. Если толщина базы $W \gg L_p$, то диффузная емкость

$$C_D = \frac{1}{2} \left(\frac{q}{kT} \right) I \tau_p,$$

где τ_p — среднее время диффузии носителей в p -области.

При $W \ll L_p$

$$C_D = \left(\frac{q}{kT} \right) I \tau_D,$$

где τ_D — среднее время диффузии носителей через n -область, $\tau_D = \frac{W^2}{2D_p}$; D_p — коэффициент диффузии дырок.

При больших прямых смещениях, когда ток инжекции значительно превышает ток рекомбинации, C_D экспоненциально возрастает с ростом напряжения и значительно превышает $C_{бар}$ (рис. 1.41). При малых напряжениях диффузионная емкость меньше барьерной.

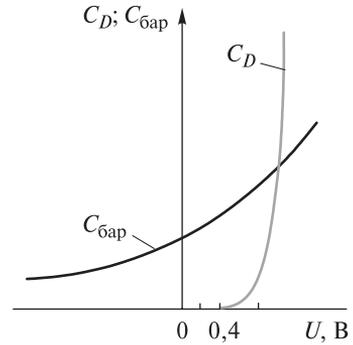


Рис. 1.41. Зависимости барьерной и диффузионной емкостей от напряжения

1.13.2. МЕХАНИЗМЫ ПРОБОЯ p - n -ПЕРЕХОДОВ

При достаточно большом обратном смещении p - n -переход «пробивается» и через него протекает очень большой ток. Различают три основных механизма пробоя: туннельный эффект, лавинное умножение, тепловая неустойчивость.

Туннельный пробой. В основе данного вида пробоя лежит туннельный эффект, т. е. проникновение электронов сквозь потенциальный барьер, когда его толщина достаточно мала (рис. 1.42). Когда электрическое поле в германиевых или кремниевых p - n -переходах достигает $\sim 10^6$ В/см, начинают протекать токи, обусловленные туннельными переходами между зонами. Для получения таких полей концентрации примеси в p - и n -областях должны быть достаточно высокими. Туннельный пробой происходит в германиевых и кремниевых p - n -переходах при напряжениях пробоя, меньших $4E_g/q$. При напряжениях пробоя $(4..6)E_g/q$ пробой обусловлен как туннельным, так и лавинным механизмами. При напряжениях пробоя больших $6E_g/q$ пробой связан с лавинным механизмом. Поскольку ширина запрещенной зоны Ge, Si, GaAs уменьшается с увеличением температуры, напряжение пробоя, связанное с туннельным эффектом, имеет отрицательный температурный коэффициент.

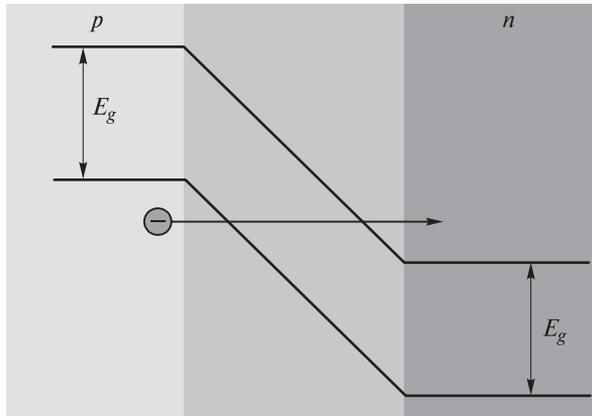


Рис. 1.42. Схема межзонного туннелирования

Лавинное умножение. Напряжение лавинного пробоя определяет верхний предел обратного напряжения диодов и коллекторного напряжения биполярного транзистора. Процесс лавинного пробоя полупроводника аналогичен ударной ионизации в газе. Электрон или дырка, ускоренные полем, могут ионизировать атом полупроводника, в результате чего получится новая пара электрон–дырка, а ток через p – n -переход возрастает. При достаточно большой напряженности электрического поля ионизация может приобрести лавинный характер. При лавинном пробое пробивное напряжение с ростом температуры увеличивается.

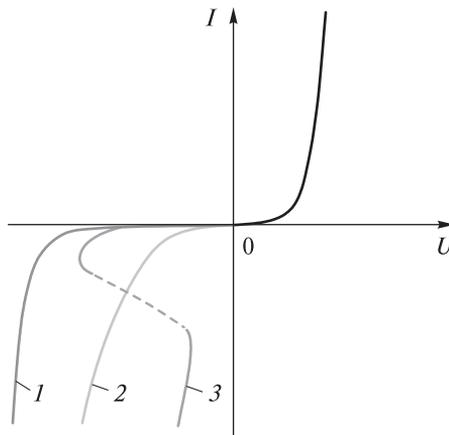


Рис. 1.43. Вид ВАХ кремниевых p – n -переходов:

1 — лавинный пробой; 2 — туннельный пробой; 3 — тепловой пробой

Для резкого несимметричного p - n -перехода напряжение пробоя

$$U_{\text{пр}} = \frac{\epsilon_{\text{пр}} W}{2} = \frac{\epsilon_n \epsilon_0 \epsilon_m^2}{2qN_D},$$

где N_D — концентрация примеси в слаболегированной области; ϵ_m — максимальное электрическое поле.

Тепловой пробой. Тепловой механизм пробоя обусловлен выделением теплоты в p - n -переходе при протекании обратного тока $I_{\text{об}}$. Рассеиваемая в переходе мощность $P = UI_{\text{об}}$. Под действием этой мощности увеличивается температура перехода, а следовательно, растет и обратный ток. Вследствие теплового нагрева на обратной ветви ВАХ появляется участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением, ток резко возрастает, и диод выходит из строя. На рис. 1.43 показаны ВАХ кремниевых p - n -переходов с лавинным, туннельным и тепловым пробоями.

Тесты к лекции 1.13

1. Как барьерная емкость зависит от приложенного к p - n -переходу напряжения?

- а) чем больше обратное напряжение, тем барьерная емкость меньше;
- б) чем меньше обратное напряжение, тем барьерная емкость меньше;
- в) чем больше прямое напряжение, тем барьерная емкость меньше.

2. Как диффузионная емкость зависит от приложенного к p - n -переходу напряжения?

- а) чем больше прямое напряжение, тем диффузионная емкость больше;
- б) чем больше прямое напряжение, тем диффузионная емкость меньше;
- в) никак не зависит.

3. Что такое туннельный пробой p - n -перехода?

а) электрический пробой p - n -перехода, вызванный туннельным эффектом;

- б) тепловой пробой p - n -перехода;
- в) электромагнитный пробой p - n -перехода.

4. Что такое лавинный пробой p - n -перехода?

а) электрический пробой p - n -перехода, вызванный лавинным размножением носителей заряда под действием сильного электрического поля;

- б) пробой p - n -перехода, вызванный сильным нагревом;
- в) пробой p - n -перехода, вызванный большим прямым приложенным напряжением.

5. Что такое тепловой пробой p - n -перехода?

а) пробой, обусловленный выделением теплоты в p - n -переходе при протекании обратного тока в результате приложения большого обратного напряжения;

б) пробой, обусловленный поглощением теплоты в p - n -переходе при протекании прямого тока;

в) пробой, обусловленный лавинным размножением фононов в полупроводнике.