

ЛЕКЦИЯ 5

Электрические свойства материалов-2. Эффекты в сильных электрических полях. Эффект Ганна. Туннельный эффект

Во внешнем однородном электрическом поле зоны энергии идеального кристалла наклоняются (рис. 1). При этом уровни энергии поднимаются, если $U > 0$ и опускаются, если $U < 0$. Происходит перераспределение электронов, т. к. они движутся в некоторой области Δx , ширина которой пропорциональна напряженности \mathcal{E} внешнего электрического поля. Электрон переходит с уровня на уровень и у него изменяется волновой вектор k и квазиимпульс p от времени: $k=k(t)$ и $p=p(t)$. Возможен переход электрона из валентной зоны в зону проводимости в результате туннельного эффекта. Вероятность туннельного эффекта зависит от ширины Δx и высоты E_g потенциального барьера (рис. 2):

$$U(B) - U(A) = -eE\Delta x$$

Ширина потенциального барьера зависит от напряженности электрического поля:

$$\Delta x = \frac{E_g}{eE}$$

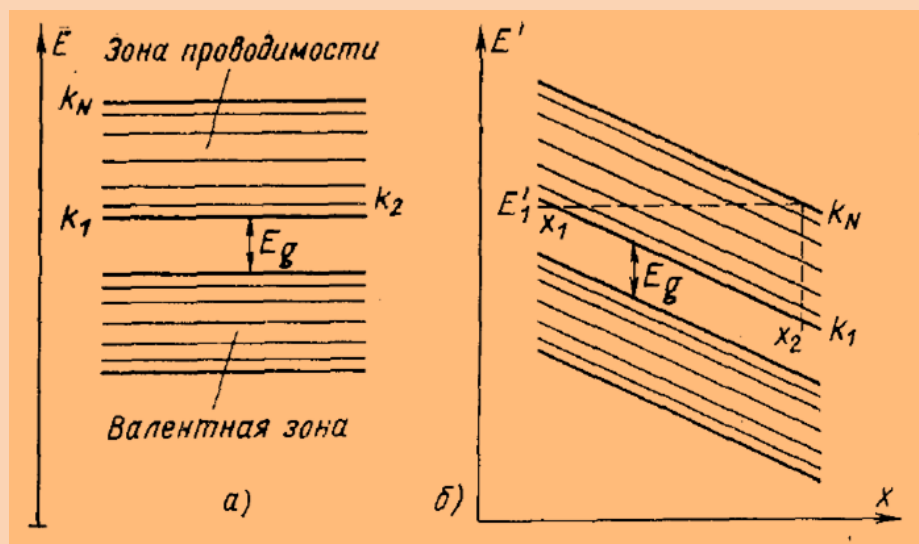


Рисунок 1 – Наклон энергетических зон во внешнем электрическом поле

Вероятность одна и та же для туннельных переходов из валентной зоны в зону проводимости ($V \rightarrow C$) и $C \rightarrow V$. Но поскольку в V-зоне электронов намного больше, чем в зоне проводимости, то будет иметь место

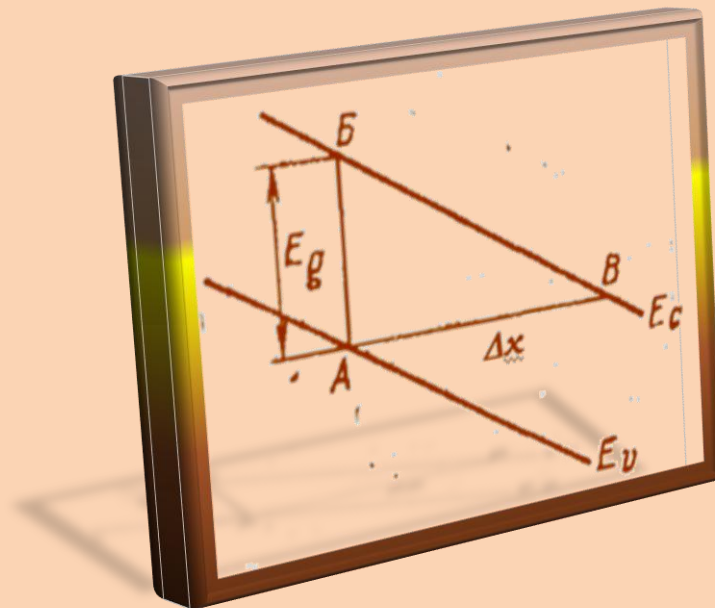


Рисунок 2 – Межзонный переход электрона в результате эффекта туннелирования

преимущественный переход электронов из валентной зоны в зону проводимости. Он может осуществляться тремя путями (рис. 3): термической генерацией (многофононный процесс) (1), туннелированием с поглощением фононов (2) и туннелированием или бесфононной генерацией (3).

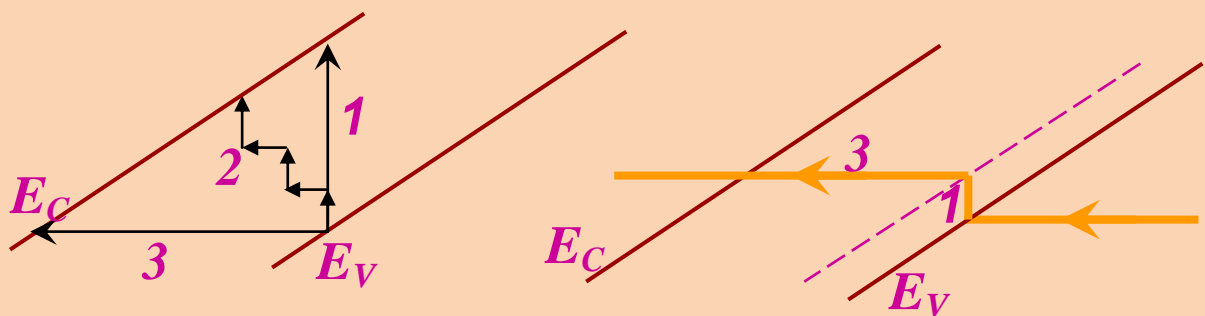


Рисунок 3 – Генерация свободных электронов в полупроводнике, находящемся во внешнем электрическом поле: 1 – фононный, 2 – смешанный, 3 – бесфононный или туннельный переходы. На правом рисунке показана комбинация термического (1) и туннельного (3) переходов через примесный уровень

Эффект Ганна



Это движение домена сильного электрического поля по кристаллу полупроводника с генерацией СВЧ-колебаний с частотой около 10^{10} Гц, обусловлен структурой энергетической зоны проводимости и не требует создания p - n перехода. Основан на междолинных переходах электронов в полупроводниках типа A^3B^5 , таких как GaAs, InP, GaP, InSb, InAs, а также ZnSe и CdTe с донорным типом проводимости в результате приложения к однородному полупроводнику сильного электрического поля. Эффект Ганна лежит в основе работы диода Ганна, который имеет N -образную вольт-амперную характеристику с участком отрицательного дифференциального сопротивления.

В арсениде галлия зона легких электронов с эффективной массой m_1^* и подвижностью $\mu_1 = 4000$ - 8000 $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ располагается на $0,36$ эВ ниже верхней долины тяжелых электронов с массой m_2^* и подвижностью $\mu_2 \approx 100$ $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

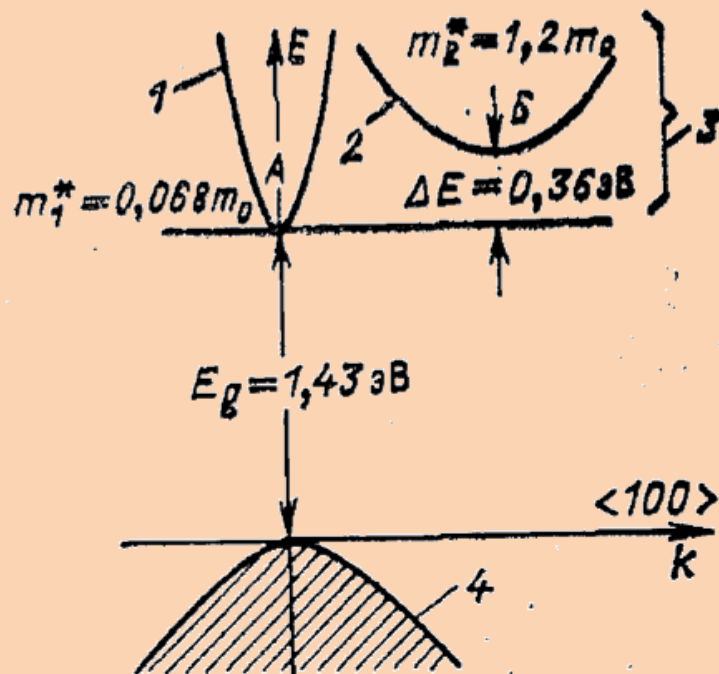


Рисунок 4 - Зонная диаграмма n -GaAs: 1 – нижний минимум, 2 – верхняя долина, 4 – валентная зона, 3 – зона проводимости

В слабых электрических полях (меньше критического значения) все электроны находятся в основной нижней долине. В кристалле арсенида галлия критическое поле соответствует значению 3,2 кВ/см. Это участок на рис. 5, где линейную зависимость плотности тока можно выразить уравнением

$$j_1 = eN_1\mu_1E_1$$

При дальнейшем возрастании напряженности электрического поля электроны из нижней долины за время порядка 10^{-12} с начинают переходить в верхнюю долину, становясь тяжелыми и медленными, а на ВАХ появляется нисходящий участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением:

$$r_d = \frac{dE}{dj} = \frac{E_2 - E_1}{j_2 - j_1}$$

Геометрически по рисунку 5 величину этого сопротивления действительно можно найти как разность значений в точках 2 и 1. Однако вследствие того, что $j_2 < j_1$, то их разность даст знак минус в знаменателе дроби и отсюда появится отрицательное значение самого дифференциального сопротивления. Начиная с $E_2=20$ кВ/см все электроны проводимости находятся в верхней долине и рост величины поля уже не приводит к столь резкому увеличению плотности тока через кристалл. На этом участке зависимость выражается аналогично первому участку:

$$j_2 = eN_2\mu_2E_2$$

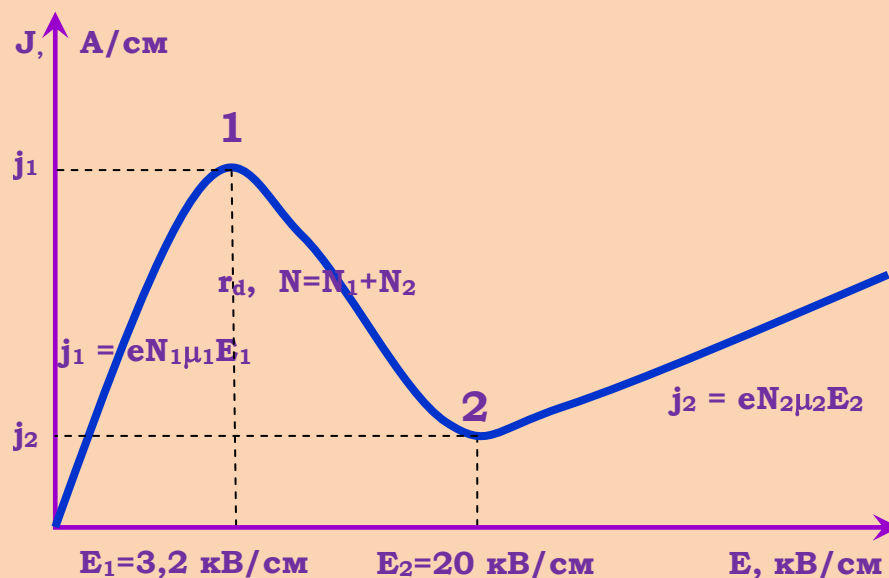


Рисунок 5 – ВАХ диода Ганна

Рассмотрим механизм образования и движения домена. В однородном полупроводнике электрическое поле примерно одинаково по всей длине. Поэтому для проявления эффекта Ганна возле катода технологи создают локальную неоднородность с повышенным сопротивлением – барьер $n^+ - n$ (рис. 6). Именно на этой неоднородности зарождается домен по достижении полем критического значения. Электроны в домене находятся в верхней долине, они тяжелые и медленные. Вне домена находятся быстрые легкие электроны, энергетически они пребывают в нижней долине. Домен движется к аноду со скоростью около 10^7 см/с, а сзади его догоняют быстрые электроны. Позади домена образуется область локального отрицательного заряда. Те же быстрые электроны впереди домена убегают от него и формируют на фронте домена положительный заряд (рис. 7). Получается как бы движущийся по кристаллу $p - n$ переход. Домен добирается до анода и исчезает. Только после этого у катода зарождается следующий домен и весь процесс повторяется. Площадь торцов кристалла $S = 100 \times 100$ мкм², длина $L = 5 - 100$ мкм. На торцы кристалла нанесены металлические контакты. Теплоотвод используется для избежания перегрева диода. Скорость домена меньше максимальной скорости быстрых электронов, которые в момент подключения поля дают максимальный ток I_{max} . Почти сразу же формируется домен и ток спадает до I_{min} , определяемого скоростью установившегося движения домена:

$$I_{min} = SeNv_d$$

Здесь S – площадь сечения образца. Связь между генерируемой мощностью P и частотой f задается через импеданс Z :

$$P = \frac{U^2}{Z} = \frac{E^2 L^2}{Z} = \frac{E^2 v^2}{Z f^2}$$

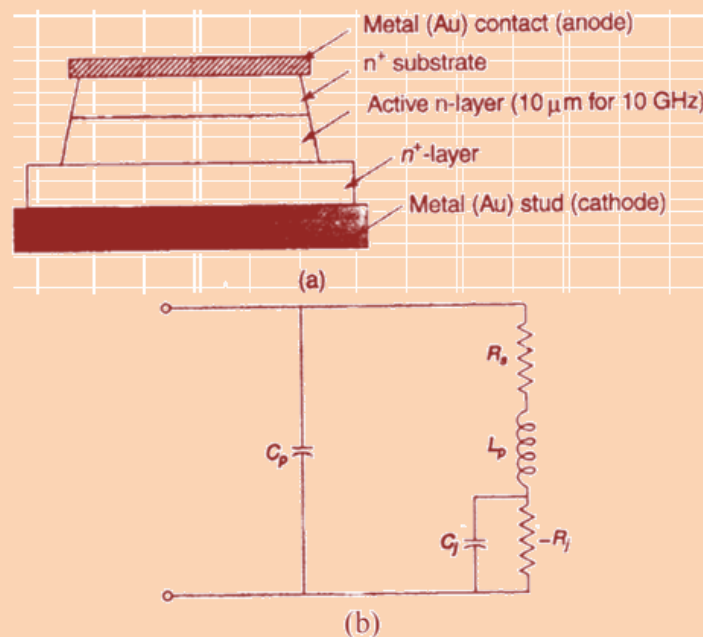


Рисунок 6 – Конструкция диода Ганна и его эквивалентная схема

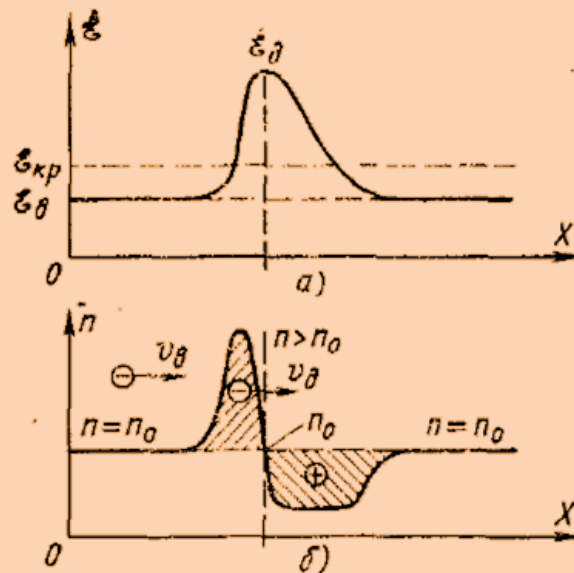


Рисунок 7 – Распределение электрического поля (вверху) и плотности электронов (внизу) вдоль образца при движении домена со скоростью v_d

Минимальное значение тока сохраняется в течение всего времени движения домена от катода к аноду и выражается через толщину кристалла между обоими электродами, отнесенную к скорости домена:

$$T = \frac{L}{v_d}$$

В результате движения домена по кристаллу во внешней цепи появляется импульс тока. Скважность s импульсов тока определяется временем T прохождения домена:

$$s = \frac{T}{t}$$

Здесь t – длительность импульса.

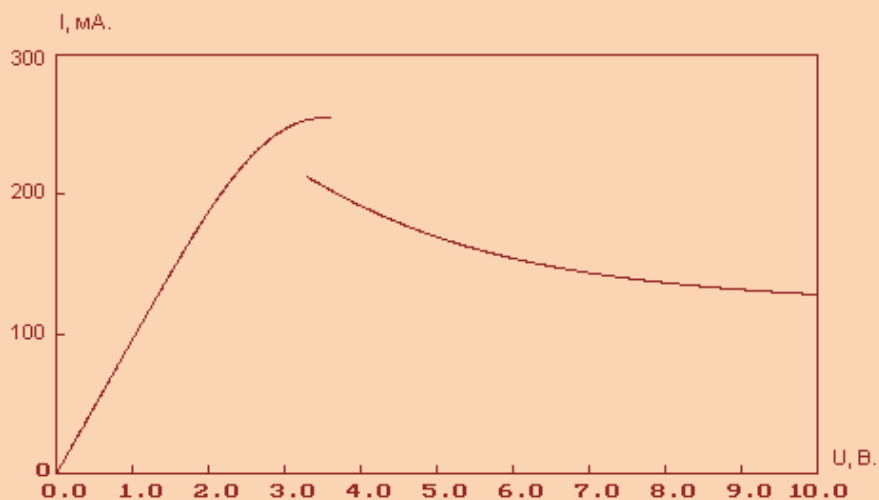


Рисунок 8 – Осциллограмма ВАХ диода Ганна

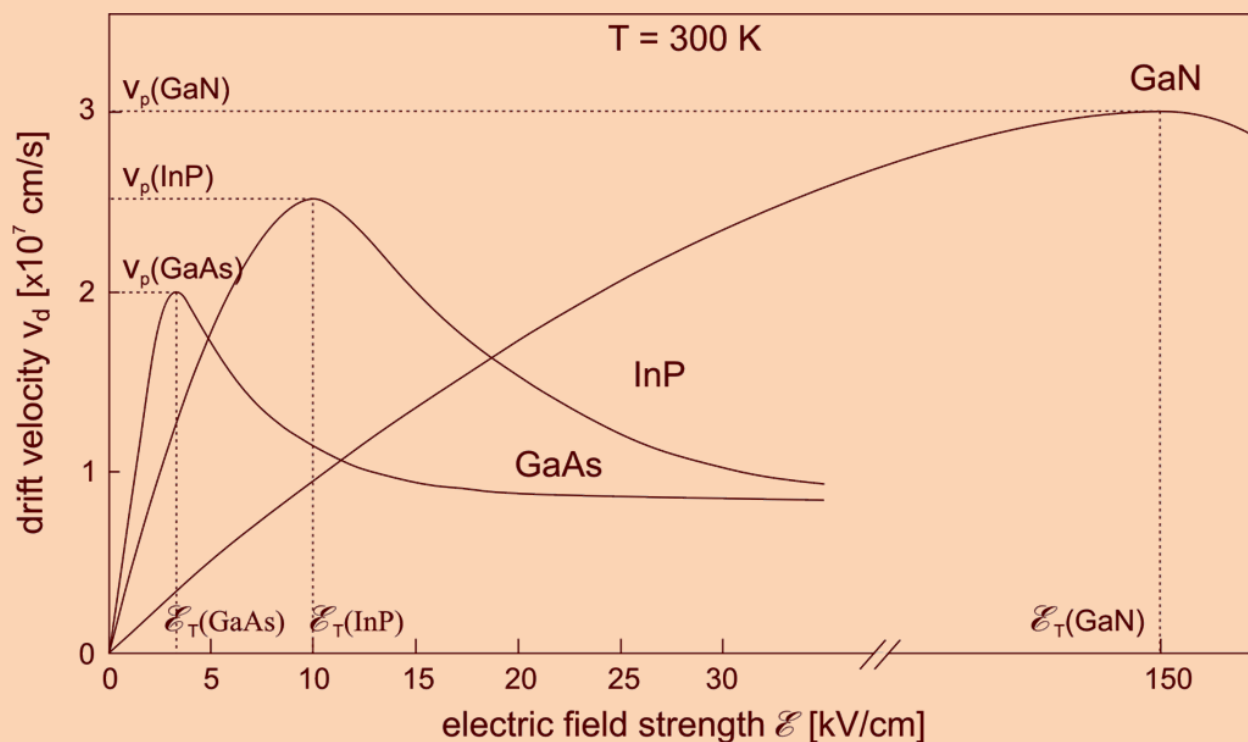


Рисунок 9 – Зависимости дрейфовой скорости в GaN, InP и GaAs от напряженности электрического поля

При толщине образца 50 мкм частота колебаний тока должна составлять около 2 ГГц. На GaN-диодах достигнуты рекордные значения частоты – 3 ТГц (3×10^{12} Гц). Несмотря на то, что в кристалле присутствуют несколько неоднородностей, домен зарождается всегда только на одной из них. Максимальная мощность диодов Ганна менее 200-300 мВт, КПД ~ 2-4 %.

Зонные диаграммы полупроводников для диодов Ганна приведены на рис. 10.

Туннельный диод

В $p-n$ переходе, образованном двумя областями невырожденного полупроводника, ток обусловлен прохождением электронов над потенциальным барьером. В случае вырожденного полупроводника с $N_{A,D} = 10^{18} - 10^{20} \text{ см}^{-3}$ переходный слой (ширина ОПЗ) будет очень тонкий и возможно прохождение электронов через переход в результате туннельного эффекта. Такой механизм преодоления потенциального барьера можно связать с волновым представлением движения электрона в твердом теле, когда при столкновении с барьером электрон, подобно волне проникает на какую-то глубину внутри него. В тонком $p-n$ переходе существует вероятность найти электрон за барьером. Вид ВАХ туннельного диода резко отличается от ВАХ обычного выпрямляющего диода: на обратной ветви наблюдается резкий рост тока при обратной полярности U , а на прямой ветви возникает участок

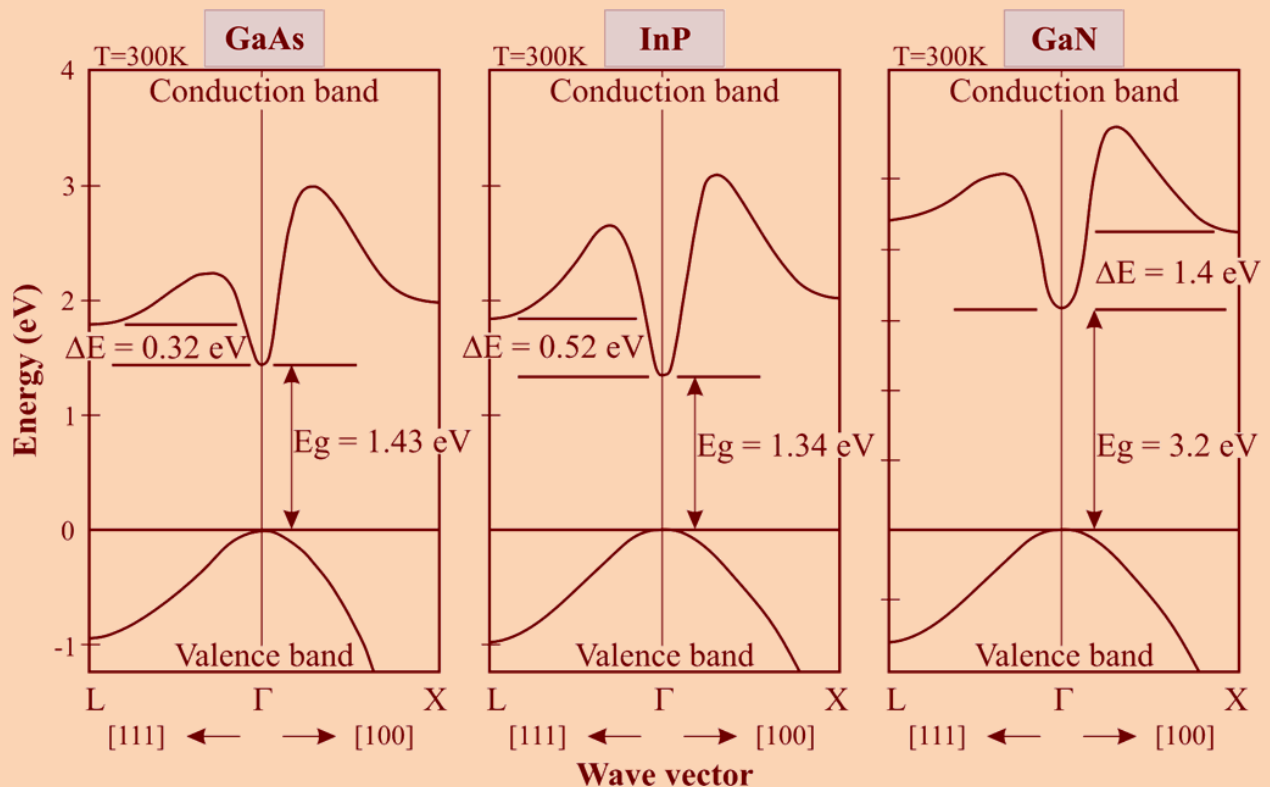


Рисунок 10 – Зонные диаграммы «ганновских» полупроводников

отрицательного дифференциального сопротивления (т. наз. *N*-образная ВАХ, рис. 11). Значительный туннельный ток возникает в переходе 10 нм, когда при контактной разности потенциалов порядка 1 В напряженность электрического поля в переходе $E \rightarrow 10^6$ В/см. В результате сильного легирования уровень Ферми выходит из запрещенной зоны и смещается в ближайшую разрешенную зону на $2-5 kT$ от края (т. е. от E_C или E_V).

При подаче на туннельный диод обратного напряжения, потенциальный барьер возрастает, и электрическая диаграмма будет иметь вид, показанный на рис. 11, а. Электроны *p*-области туннелируют в *n*-область. Возникающий обратный ток будет расти по абсолютному значению с ростом обратного напряжения. Можно считать, что у туннельного диода происходит пробой при малых обратных напряжениях.

В равновесном состоянии системы уровень Ферми постоянен для обеих областей полупроводникового диода, поэтому другие энергетические уровни искривляются настолько сильно, что нижняя граница дна зоны проводимости области *n*-типа оказывается ниже верхней границы потолка валентной зоны области *p*-типа, и так как переход очень узкий, то носители заряда могут переходить из одной области в другую без изменения своей энергии, просачиваться сквозь потенциальный барьер, т. е. туннелировать (точка б). В состоянии равновесия потоки электронов из одной области в другую одинаковы, поэтому результирующий ток равен нулю.

При подключении прямого напряжения уровень Ферми и положение энергетических зон сместятся относительно равновесного состояния в сторону уменьшения потенциального барьера и при этом степень перекрытия

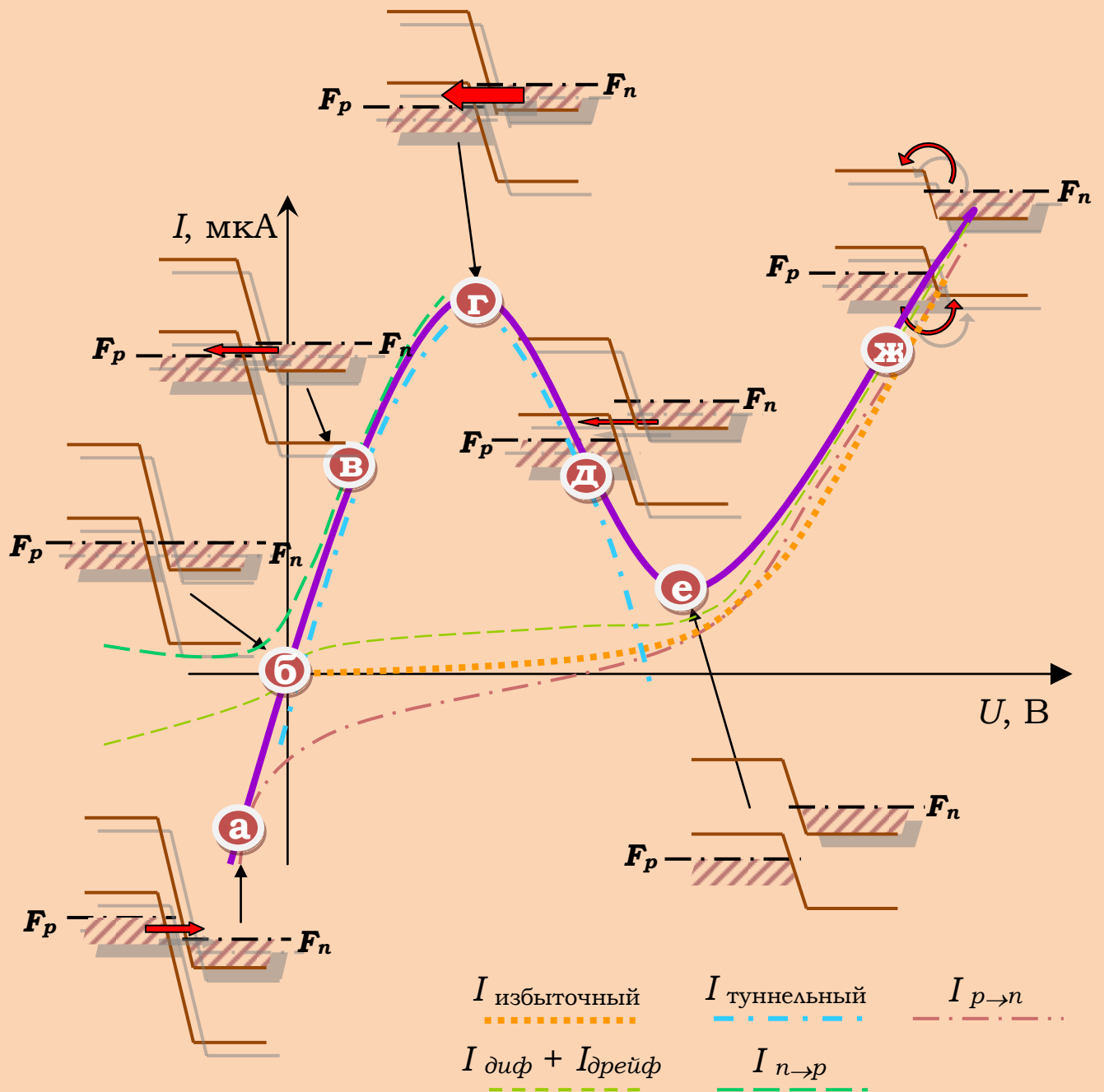


Рисунок 11 – Зонные диаграммы туннельного диода в ключевых точках ВАХ

между потолком валентной зоны материала p -типа и дном зоны проводимости материала n -типа уменьшится (е). В зоне проводимости материала n -типа уровни, заполненные электронами (ниже уровня Ферми) окажутся против незаполненных уровней в валентной зоне материала p -типа, что приведет к появлению тока, обусловленного большим количеством электронов, переходящих из n -области в p -область. Максимальное значение этого тока будет тогда, когда уровень Ферми материала n -типа и потолок

валентной зоны материала p -типа будут совпадать (z). При дальнейшем увеличении прямого напряжения туннельное перемещение электронов из n -области в p -область начнет убывать (d), так как количество их уменьшается по мере уменьшения степени перекрытия между дном зоны проводимости материала n -типа и потолком валентной зоны материала p -типа. В точке, где $E_V = E_C$, прямой ток p - n -перехода достигнет минимального значения (e), а затем, когда туннельные переходы электронов станут невозможны ($ж$), носители заряда будут преодолевать потенциальный барьер за счет диффузии и прямой ток начнет возрастать, как у обычных диодов.

Дифференциальная проводимость G дважды обращается в нуль – в точках (z) и (e). Туннельный диод способен дважды разорвать внешнюю цепь, превращаясь из пассивного элемента в активный и наоборот. Это свойство используется в импульсной технике.

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

$$r_d = \frac{dU}{dI} = \frac{U_2 - U_1}{I_2 - I_1}$$

Значения (U_1, I_1) соответствуют точке (z) на ВАХ, а (U_2, I_2) – точке (e). На участке отрицательного дифференциального сопротивления происходит генерация колебаний в микроволновом диапазоне.