

1.16. ТУННЕЛЬНЫЕ ЭФФЕКТЫ И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ СВЕРХРЕШЕТКИ

Цель лекции: ознакомление с туннельными эффектами и полупроводниковыми сверхрешетками.

1.16.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ О ТУННЕЛЬНЫХ ЭФФЕКТАХ

Туннельный эффект, как было показано ранее, заключается в прохождении микрочастиц сквозь потенциальный барьер, высота которого больше энергии налетающей частицы. Вероятность прохождения микрочастицы сквозь барьер называется коэффициентом прозрачности D . Значение D тем больше, чем меньше ширина барьера и разность между его высотой и энергией частицы. При прохождении частицей потенциального барьера посредством туннелирования ее энергия не изменяется. Вероятность туннельного эффекта велика, если ширина потенциального барьера соизмерима с длиной волны де Бройля электрона. Туннельный эффект широко используется во многих приборах микро- и наноэлектроники (туннельные диоды, обращенные переключающие диоды, диоды Зенера, сверхрешетки и др.). Он определяет пределы функционирования элементов интегральных схем на основе традиционных принципов. В частности, толщина подзатворного диэлектрика МДП-транзисторов ограничивается значением прямого туннельного тока.

Уникальными свойствами обладает резонансный туннельный эффект, который проявляется в двух- или многобарьерной периодической структуре и состоит в резком увеличении вероятности прохождения частицы сквозь барьеры, если ее энергия совпадает с каким-либо размерным уровнем энергии в потенциальной яме, разделяющей барьеры. Резонансное туннелирование сквозь ряд барьеров возникает только в случае, если ширина ям и барьеров имеет порядок длины волны де Бройля. В этом эффекте время прохождения структуры электроном включает помимо времени туннелирования время пребывания электрона в яме, разделяющей барьеры, т. е. время его жизни на резонансном уровне.

На основе двухбарьерных структур могут работать СВЧ-приборы в диапазоне сотен гигагерц и переключатели с задержкой менее 1 пс. Созданы приборы на основе двухбарьерной структуры — резонансно-туннельные диоды и транзисторы. Разработаны и находят все более широкое применение многобарьерные структуры, которые называются сверхрешетками.

1.16.2. СИЛЬНОПОЛЕВАЯ ТУННЕЛЬНАЯ ИНЖЕКЦИЯ

Основным механизмом переноса заряда в МДП-структурах является сильнополевая туннельная инжекция носителей по Фаулеру — Нордгейму. При малых толщинах слоя оксида может осуществляться прямое туннелирование через слой диэлектрика. Граница между прямым туннелированием и сильнополевой инжекцией по Фаулеру — Нордгейму лежит в диапазоне 3,5...4,0 нм.

В сильных электрических полях в МДП-структурах возникает треугольный потенциальный барьер, образующийся за счет изгиба зон в диэлектрике, через который осуществляется квантово-механический туннельный перенос электронов (рис. 1.70).

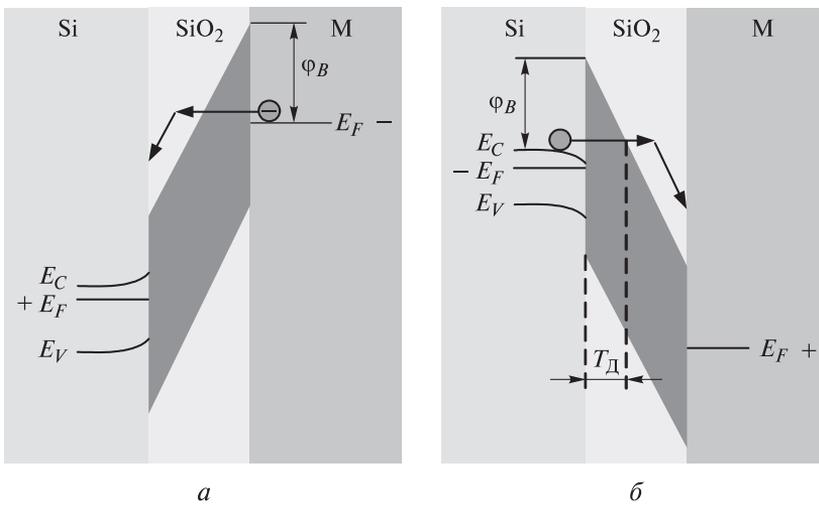


Рис. 1.70. Зонные диаграммы МДП-структур при инжекции электронов из полупроводника (а) и металла (б)

При положительной полярности напряжения на металлическом затворе треугольный потенциальный барьер образуется на границе Si-SiO₂ (см. рис. 1.70, а), при отрицательной — на границе SiO₂-M (рис. 1.70, б).

Зависимость плотности тока сильнополевой туннельной инжекции по Фаулеру — Нордгейму описывается следующим выражением:

$$j = \frac{A}{\Phi_B} \epsilon^2 \exp\left(-\frac{B\Phi_B^{3/2}}{\epsilon}\right),$$

где A , B — соответствующие коэффициенты; Φ_B — высота потенциального барьера на инжектирующей границе.

Высота потенциального барьера на границе Si-SiO₂ составляет 2,8...3,19 эВ.

Экспериментальные зависимости тока сильнополевой туннельной инжекции рассматривают в координатах Фаулера — Нордгейма: $\ln(j/\epsilon^2) = f(1/\epsilon)$.

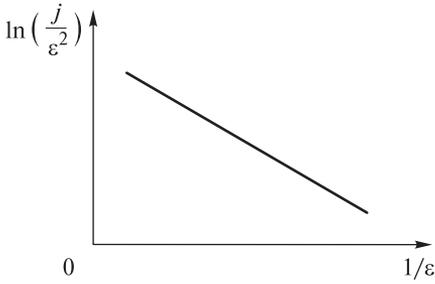


Рис. 1.71. Вольт-амперная характеристика в координатах Фаулера — Нордгейма

По наклону прямой, построенной в координатах Фаулера — Нордгейма, определяют высоту потенциального барьера на инжектирующей границе (рис. 1.71).

Сильнополевая туннельная инжекция по Фаулера — Нордгейму может использоваться для модификации (целенаправленного изменения) характеристик МДП-структур. Сильнополевой инжекцией электронов в диэлектрике, содержащем электронные ловушки, можно изменять зарядовое состояние подзатворной системы. В процессе сильнополевой инжекции осуществ-

ляется заполнение инжектированными электронами электронных ловушек, и в диэлектрике образуется отрицательный заряд, сохраняющийся после прекращения инжекции. Это позволяет изменять пороговое напряжение МДП-транзисторов.

Инжекционная модификация применяется в полевых приборах на основе МДП-структур, параметры которых можно изменять после их изготовления с помощью сильнополевой инжекции.

1.16.3. ТУННЕЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ В $p-n$ -ПЕРЕХОДЕ, ОБРАЗОВАННОМ ВЫРОЖДЕННЫМИ ПОЛУПРОВОДНИКАМИ

Вырождение полупроводников и малые значения ширины $p-n$ -перехода достигаются за счет сильного легирования $p-n$ -областей. Уровень Ферми в этом случае располагается в валентной области полупроводника p -типа и в зоне проводимости полупроводника n -типа.

Зонные диаграммы контакта двух вырожденных полупроводников приведены на рис. 1.72. Малая ширина $p-n$ -перехода позволяет электронам туннелировать из зоны проводимости n -области на свободные уровни в валентной зоне, а дыркам — из валентной области в зону проводимости n -области.

При отсутствии внешнего смещения встречные потоки дырок и электронов будут равны, а результирующий ток через $p-n$ -переход будет равен нулю (рис. 1.72, а). При подаче прямого смещения на $p-n$ -переход зона проводимости n -области сместится вверх, и заполненные уровни n -области окажутся напротив свободных уровней валентной зоны p -области (рис. 1.72, б). Вероятность перехода электронов из зоны проводимости n -области в p -область увеличивается, а вероятность перехода дырок из валентной зоны p -области уменьшается. В результате через $p-n$ -переход потечет прямой ток, увеличивающийся с ростом прикладываемого напряжения и достигающий максимума, когда заполненная часть зоны проводимости n -области будет располагаться напротив незаполненной части валентной зоны.

При дальнейшем увеличении прямого смещения перекрытие этих частей зон уменьшается, и ток туннелирования падает до нуля. При $U > U_B$ через

p - n -переход протекает обычный диффузионный ток или ток рекомбинации (рис. 1.72, ϵ). При обратном смещении (рис. 1.72, ϵ) туннельный ток возрастет с увеличением напряжения, так как все большее число электронов из валентной зоны p -области переходит в зону проводимости n -области.

Вольт-амперная характеристика туннельного диода показана на рис. 1.73. Участок OA — возрастание туннельного тока, участок AB — уменьшение, BC — диффузионная ветвь ВАХ. На участке отрицательного сопротивления AB действует положительная обратная связь по напряжению; U_m — напряжение, при котором дифференциальная проводимость первый раз обращается в нуль и соответствует пику прямого тока и началу участка AB с отрицательным дифференциальным сопротивлением; U_B — напряжение, при котором дифференциальная проводимость второй раз обращается в нуль и соответствует окончанию участка AB с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Увеличение внешнего напряжения (рис. 1.74) приводит к уменьшению туннельного тока и, следовательно, к уве-

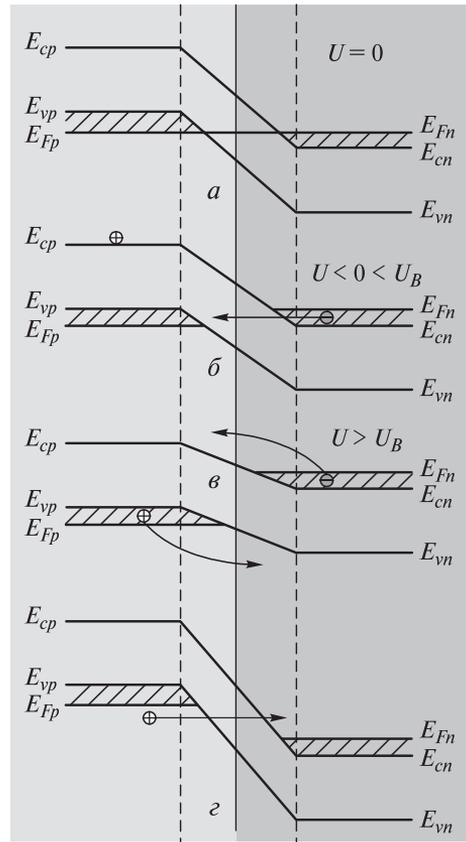


Рис. 1.72. Зонные диаграммы туннельного диода

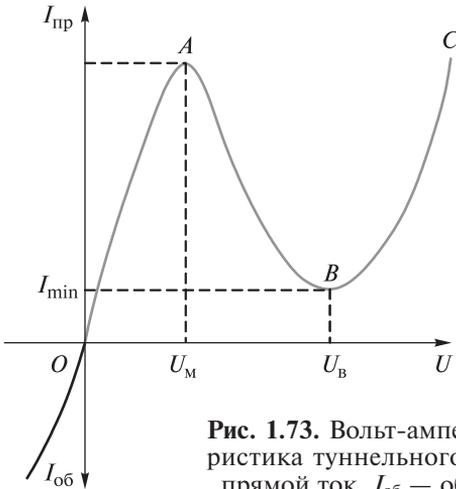


Рис. 1.73. Вольт-амперная характеристика туннельного диода ($I_{пр}$ — прямой ток, $I_{об}$ — обратный ток)

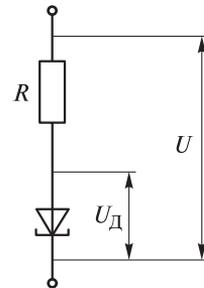


Рис. 1.74. Последовательное включение резистора и туннельного диода

личению сопротивления туннельного диода. Вследствие перераспределения внешнего напряжения падение напряжения на диоде U_d возрастает, что приводит к еще большему увеличению сопротивления.

Туннельные диоды обладают высоким быстродействием (время переключения — единицы наносекунд). Различают усилительные, генераторные и переключающиеся туннельные диоды. Усилительные туннельные диоды применяются в усилителях и гетеродинах приемных устройств, в схемах детекторов и смесителей диапазона СВЧ, генераторные — в СВЧ генераторах диапазона волн 1...10 см, переключающиеся — в импульсных схемах наносекундного диапазона длин волн.

1.16.4. РЕЗОНАНСНО-ТУННЕЛЬНЫЕ ДИОДЫ

Резонансно-туннельный диод (РТД) представляет собой диод с несколькими (как правило, с двумя) потенциальными барьерами, в котором реализуются условия для резонансного туннелирования. Физический смысл работы РТД состоит в том, что электронная волна проникающего через первый барьер электрона попадает в потенциальную яму, в которой она практически полностью «отражается» от стенок и интерферирует с волной продолжающего туннелировать электрона. В случае если фазы падающей и дважды отраженной от стенок волн совпадают, то амплитуда волны в яме резко возрастает, что вызывает резкое резонансное возрастание тока, протекающего через структуру. Условием возникновения резонанса является совпадение энергии туннелирующего электрона с уровнем энергии в квантовой яме.

Структура РТД представлена на рис. 1.75. Сильнолегированные слои n^+ -GaAs составляют эмиттер и коллектор. Слой слаболегированного n -GaAs образует квантовую яму толщиной 3...10 нм. Слои $Al_xGa_{1-x}As$ толщиной 2...5 нм образуют потенциальные барьеры. Высота барьеров 2 и 4 зависит от концентрации алюминия. Высоту барьера 3 и ширину потенциальной ямы d_3 подбирают таким образом, чтобы в яме образовался только один размерный квантовый уровень E_1 .

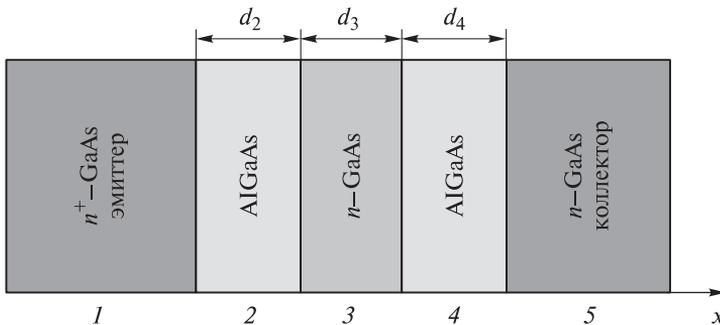


Рис. 1.75. Структура РТД:

1–5 — потенциальные барьеры; d_2 – d_4 — расстояния между квантовыми ямами

На рис. 1.76 показаны зонные диаграммы РТД в различных режимах (заполненные уровни выделены тоном).

В равновесном состоянии напряжение между эмиттерами и коллектором $U = 0$, ток в структуре отсутствует (рис. 1.76, *a*).

Если постепенно повышать напряжение на структуре, то через нее пойдет слабый ток, обусловленный обычным туннелированием электронов через потенциальный барьер 2 (участок $0-U_1$ на рис. 1.77). При этом энергетические уровни эмиттера будут подниматься относительно уровней коллектора. При напряжении U_1 , когда уровень E_{F1} сравняется с уровнем E_1 , через структуру потечет значительно больший ток, связанный с резонансным туннелированием (см. рис. 1.76). С увеличением напряжения на структуре $U_1 < U < U_2$ ток резко возрастает до тех пор, пока с уровнем E_1 потенциальной ямы не сравняется дно зоны проводимости E_{C1} (см. рис. 1.76). При дальнейшем увеличении напряжения $U > U_2$ уровень E_1 опускается ниже дна зоны проводимости в запрещенную зону, где электронов нет, и ток резко падает (см. рис. 1.76), что приводит к появлению на ВАХ участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением (см. рис. 1.77).

Аналогичные резонансные явления могут наблюдаться в структурах с тремя барьерами и в периодических сверхрешетках.

Наличие на ВАХ РТД участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением позволяет использовать данный прибор для генерации СВЧ-колебаний с частотами выше (на порядок и более), чем в обычных туннельных диодах, до 700 ГГц. Физическими факторами, ограничивающими быстродействие РТД, являются время жизни электронного состояния в яме и время пролета электроном обедненного слоя. Отрица-

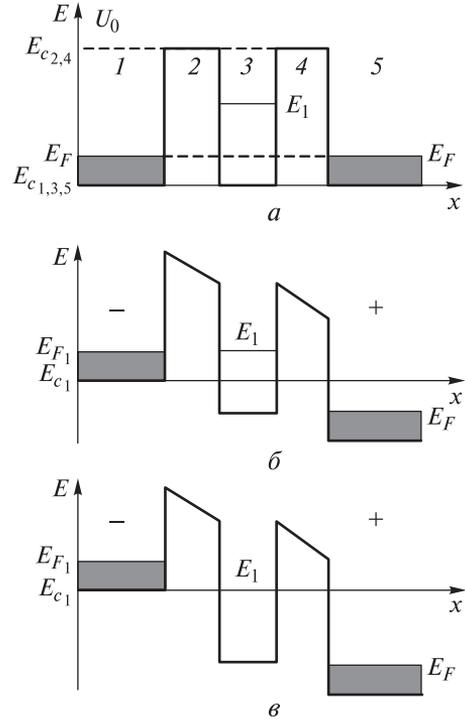


Рис. 1.76. Зонные диаграммы РТД: *a* — равновесное состояние; *б* — $U < U_1$; *в* — $U_1 < U < U_2$

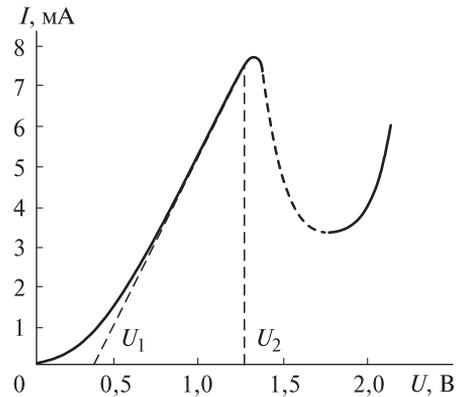


Рис. 1.77. Вольт-амперная характеристика РТД

тельное дифференциальное сопротивление в РТД сохраняется по крайней мере до частоты $\sim 2,5$ ТГц. Более высокое быстродействие РТД в основном обусловлено существенным улучшением условий для туннельного преодоления барьера и меньшей емкостью структуры. Обычные туннельные диоды работают при плотности тока $10^2 \dots 10^3$ А/см², которая ограничена невысокой прозрачностью туннельного барьера, а в РТД из-за практически 100%-ного прохождения барьера электронами в определенном интервале энергий плотность тока может достигать $4 \cdot 10^5$ А/см². Удельная барьерная емкость в РТД вследствие присутствия истощенного слоя в несколько раз меньше, чем в туннельных диодах.

Резонансно-туннельный диод преобразуется в транзистор, если к слою потенциальной ямы структуры подвести электрод, регулирующий положение размерного уровня E_1 с помощью электрического поля. На основе РТД разработаны аналого-цифровые преобразователи, работающие на частотах в несколько гигагерц, логические элементы, запоминающие устройства, которые можно использовать в процессорах, и другие цифровые устройства для быстродействующей электроники.

1.16.5. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ СВЕРХРЕШЕТКИ

Сверхрешетки — синтезированные кристаллические структуры, в которых кроме периодического потенциала кристаллической решетки имеется другой периодический потенциал, период которого значительно превышает постоянную решетки. Параметры этого потенциала можно изменять, что дает возможность управлять энергетическим спектром носителей.

Для создания требуемой искусственной периодической структуры применяют два способа.

1. Используют один и тот же полупроводник, но легируют его попеременно, создавая слои *n*- и *p*-типов (так называемые *pn*-сверхрешетки, или легированные сверхрешетки). Донорные атомы в *n*-слоях отдают электроны, которые связываются акцепторными атомами в *p*-слоях. Дополнительный периодический потенциал создают чередующиеся заряды ионизированных акцепторов и доноров.

2. Используют чередующиеся слои двух различных полупроводников, в которых запрещенная зона одного материала перекрывает запрещенную зону другого (так называемые композиционные сверхрешетки). Используют гетероструктуры из чередующихся слоев различного состава и ширины запрещенной зоны, но с близкими значениями постоянной решетки, например, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}-\text{GaAs}$; $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}-\text{GaAs}$; $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}-\text{InP}$; $\text{ZnS}-\text{ZnSe}$ и др. Дополнительный периодический потенциал создается за счет периодического изменения ширины запрещенной зоны.

Оба типа сверхрешеток получают с использованием технологии молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) и газофазной эпитаксии (ГФЭ) из паров

металлоорганических соединений. Оба метода позволяют осуществлять послойное эпитаксиальное наращивание атомных слоев заданного состава на монокристаллическую подложку. Метод молекулярно-лучевой эпитаксии обычно используется для получения экспериментальных образцов гетероструктур, ГФЭ — для их массового производства. Период повторения слоев составляет от нескольких нанометров до десятков нанометров (для сравнения — постоянные решетки кристаллов Si и GaAs равны примерно 0,5 нм).

Особенностью сверхрешеток является возможность искусственно формировать их электронный спектр. Если при выращивании сверхрешетки расстояние между квантовыми ямами d_2 сделать небольшим, чтобы электроны могли туннелировать из одной ямы в другую через потенциальный барьер, образованный широкозонным полупроводником, то уровни размерного квантования, отвечающие движению электрона перпендикулярно стенкам ямы, размываются в так называемую мини-зону (рис. 1.78). При этом ширина мини-зоны определяется перекрытием волновых функций электронов в соседних ямах, а расстояние между разными мини-зонами — шириной квантовой ямы. Это позволяет, изменяя толщины слоев в сверхрешетке, направленно изменять электронный спектр полупроводника и тем самым создавать новый искусственный полупроводниковый материал, обладающий уникальными свойствами. Совокупность методов получения материалов с модифицированной зонной структурой лежит в основе так называемой зонной инженерии.

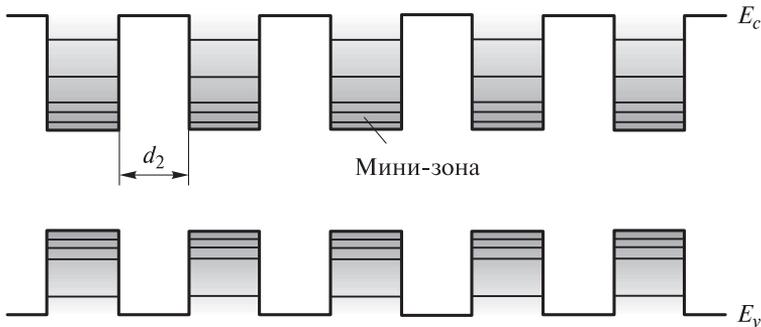


Рис. 1.78. Энергетическая диаграмма сверхрешетки

Можно сделать следующие качественные выводы относительно энергетической структуры сверхрешетки. Потенциал сверхрешетки периодичен, поэтому размерные уровни расщепляются в зоны. Спектр имеет зонный характер; в зоне столько уровней, сколько ям в структуре. Поскольку период сверхрешетки значительно больше ее постоянной, получающиеся сверхрешеточные зоны представляют собой более мелкое дробление энергетических зон исходных полупроводниковых кристаллов и называются мини-зонами.

Чем меньше ширина ямы, тем больше расстояние между мини-зонами и больше эффективная ширина запрещенной зоны; чем меньше ширина

барьера, тем шире мини-зоны. Таким образом, можно перестраивать энергетический спектр сверхрешетки простым изменением толщины слоев, что легко осуществить в методе МЛЭ. График плотности состояний $g(E)$ имеет ступенчатый вид, как и $g(E)$ для квантовой ямы, но с иной формой ступеней.

Сверхрешетки используются в ряде полупроводниковых приборов, например, в лазерах, светодиодах, фотоприемниках, а также в транзисторах и других устройствах с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Принципы действия подобных приборов основаны на специфических для сверхрешеток явлениях: квантовом ограничении носителей заряда в потенциальных ямах, пространственном разделении электронов и дырок (большие времена жизни неравновесных носителей) или электронов и доноров (высокие подвижности), резонансном туннелировании, малых временах туннельных переходов, возможности перестройки энергетического спектра.

Тесты к лекции 1.16

1. Как называется вероятность прохождения микрочастицы сквозь потенциальный барьер?

- а) коэффициент прозрачности;
- б) коэффициент вероятности;
- в) коэффициент прохождения.

2. Что такое резонансный туннельный эффект?

- а) резкое увеличение вероятности прохождения частицы сквозь барьеры, если ее энергия совпадает с каким-либо размерным уровнем энергии в потенциальной яме, разделяющей барьеры;
- б) резкое уменьшение вероятности прохождения частицы сквозь барьеры, если ее энергия совпадает с каким-либо размерным уровнем энергии в потенциальной яме, разделяющей барьеры;
- в) резкое увеличение вероятности прохождения частицы сквозь барьеры, если ширина потенциальной ямы кратна периоду кристаллической решетки полупроводника.

3. Для чего может использоваться сильнополевая туннельная инжекция по Фаулеру — Нордгейму?

- а) для модификации (целенаправленного изменения) характеристик МДП-структур;
- б) для увеличения граничной частоты СВЧ-устройств;
- в) для сглаживания пульсаций в источниках питания.

4. В чем особенность ВАХ туннельного диода?

- а) наличие области с отрицательным дифференциальным сопротивлением;
- б) наличие области с горизонтальным участком;
- в) наличие области в виде фигуры Лиссажу.

5. Что такое резонансно-туннельный диод?

- а) диод с несколькими потенциальными барьерами, в котором реализуются условия для резонансного туннелирования;
- б) диод с одним потенциальным барьером, который используется в выпрямительных устройствах;
- в) диодная сборка в виде резонансного выпрямительного моста.

6. Что такое сверхрешетка?

- а) синтезированные кристаллические структуры, в которых кроме периодического потенциала кристаллической решетки имеется другой периодический потенциал, период которого значительно превышает постоянную решетки;
- б) полупроводниковая кристаллическая структура в виде решетки с отверстиями, кратными периоду кристаллической решетки;
- в) синтезированные кристаллы, которые изменяют периодический потенциал кристаллической решетки при механическом воздействии.

7. Что такое *π*-сверхрешетка?

- а) сверхрешетка, которую получают из одного и того же типа полупроводника путем попеременного легирования, создавая слои *n*- и *p*-типов;
- б) сверхрешетка, которую получают из разных типов полупроводников путем попеременного нанесения слоев *n*- и *p*-типов;
- в) сверхрешетка, которую получают путем поочередного нанесения тонких пленок никеля Ni с чередованием диэлектрика.

8. В чем заключается особенность сверхрешеток?

- а) в возможности искусственно формировать их электронный спектр;
- б) в возможности простого определения резонансной частоты проходящей электронной волны;
- в) в создании лучших условий для эмиссии донорных атомов.