

Лекция 9

Тема Лекции:

ТУННЕЛЬНЫЙ И ОБРАЩЕННЫЙ ДИОДЫ

к.ф.-м.н., PhD, ассоциированный профессор Тулегенова Аида Тулегенкызы

Цель лекции:

Изучить физические принципы работы туннельных и обращённых диодов, рассмотреть механизм квантовомеханического туннелирования через p–n переход, построение вольтамперных характеристик и применение этих приборов в быстродействующей и наноэлектронике.

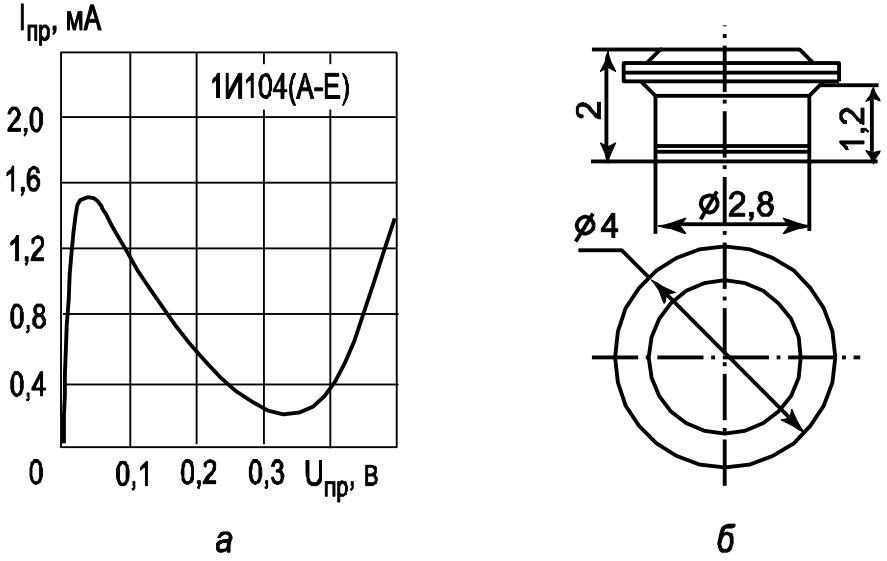
Основные вопросы:

1. Понятие туннельного диода.
2. Физика туннельного эффекта.
3. Вольтамперная характеристика туннельного диода.
4. Особенности работы туннельного диода.
5. Понятие обращённого диода.
6. Сравнение туннельного и обращённого диодов

Введение

Туннельным диодом **называют полупроводниковый диод на основе p^+-n^+ перехода с сильнолегированными областями, на прямом участке вольтамперной характеристики которого наблюдается *n*-образная зависимость тока от напряжения. Внизу приведена вольт-амперная характеристика типичного туннельного диода при прямом смещении.**

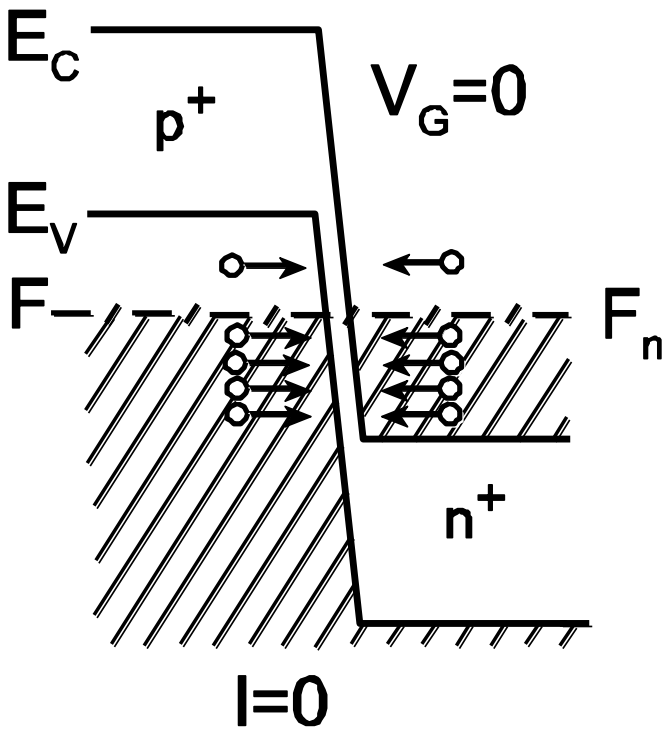
Проанализируем особенности вольт-амперной характеристики туннельного диода. Для этого рассмотрим p^+-n^+ переход, образованный двумя вырожденными полупроводниками.



***а*) вольт-амперная характеристика при прямом смещении;**

***б*) конструкция туннельного диода**

В полупроводнике n^+-типа все состояния в зоне проводимости вплоть до уровня Ферми заняты электронами, а в полупроводнике p^+-типа – дырками. Зонная диаграмма p^+-n^+ перехода, образованного двумя вырожденными полупроводниками

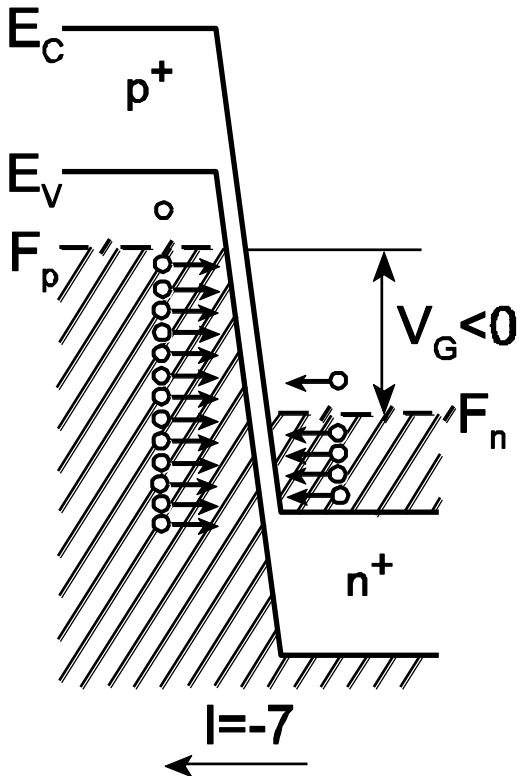


Зонная диаграмма p^+-n^+ перехода в равновесии

Рассчитаем, чему равна геометрическая ширина вырожденного *p-n* перехода. Будем считать, что при этом сохраняется несимметричность *p-n* перехода (p^+ – более сильнолегированная область). Тогда ширина p^+-n^+ перехода мала:

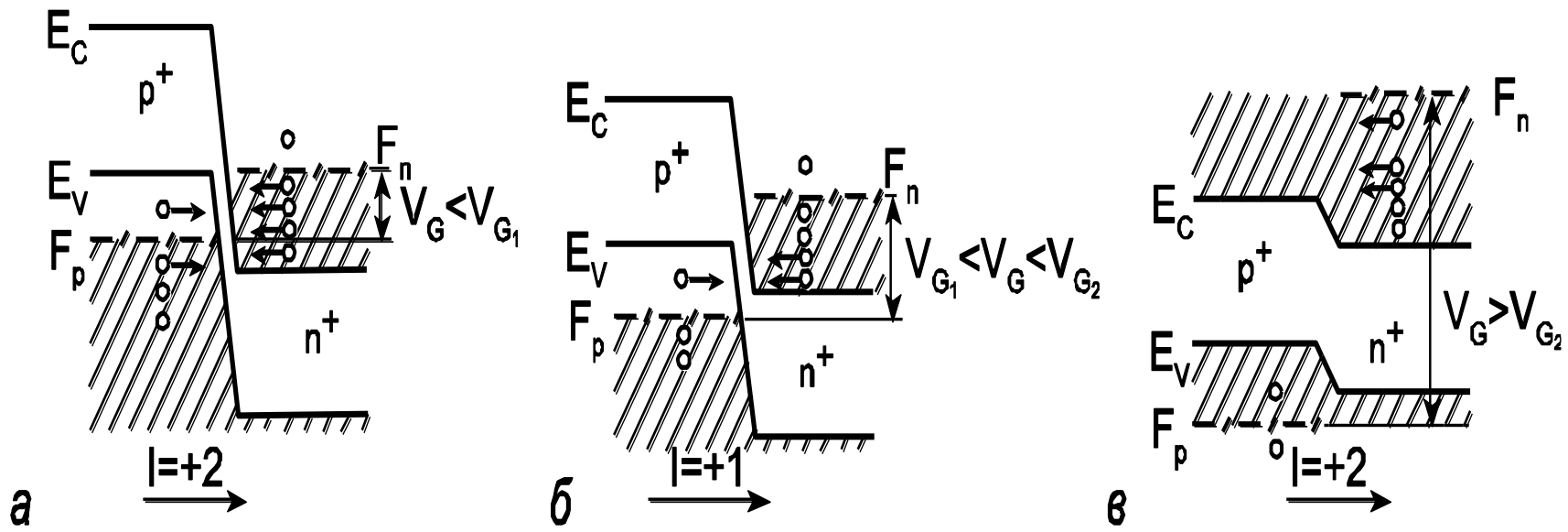
$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s\varepsilon_0 2\varphi_0}{qN_D}} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s\varepsilon_0 E_g}{qN_D}} = \sqrt{\frac{2\cdot 1\cdot 10^{-12}\cdot 1}{1.6\cdot 10^{19}}} \sim 10^{-6}\text{ñì} \sim 100\text{Å}$$

Таким образом, геометрическая ширина p^+-n^+ перехода оказывается сравнима с дебройлевской длиной волны электрона. В этом случае в вырожденном p^+-n^+ переходе можно ожидать проявления квантово-механических эффектов, одним из которых является туннелирование через потенциальный барьер. При узком барьере вероятность туннельного просачивания через барьер отлична от нуля



Зонная диаграмма туннельного диода при обратном смещении

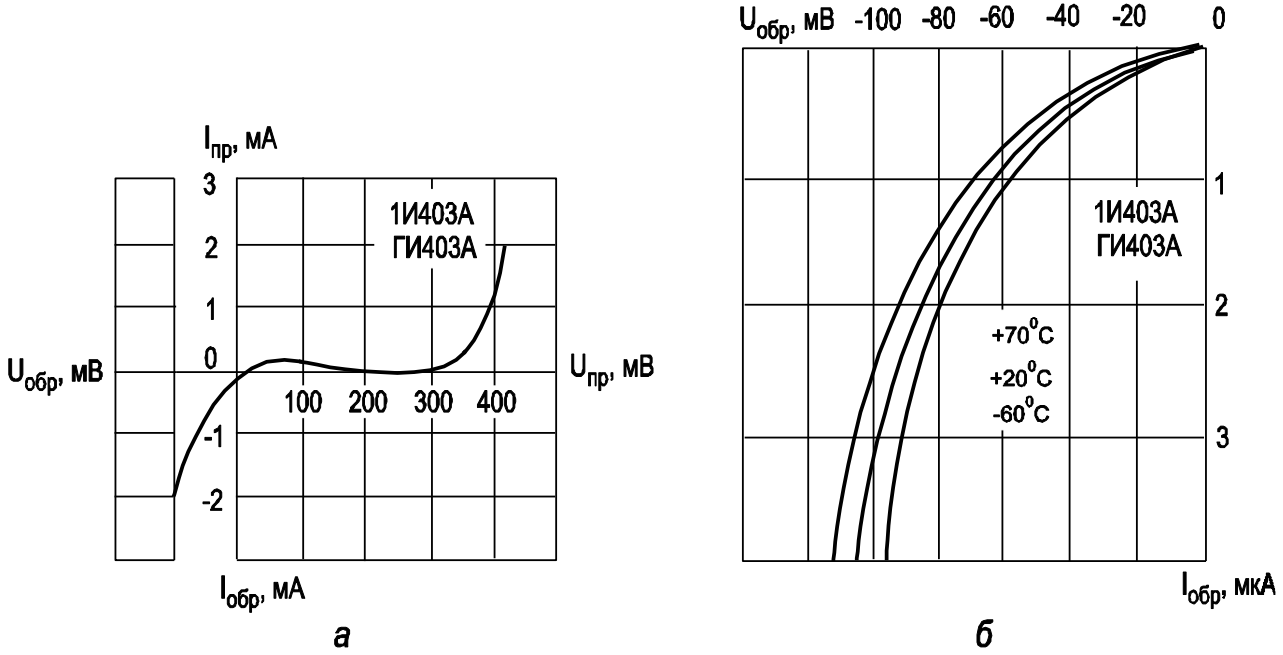
При прямом напряжении ток в диоде обусловлен туннельным переходом электронов из зоны проводимости на свободные места в валентной зоне. Поскольку туннельные переходы происходят без рассеяния, то есть с сохранением энергии туннелирующей частицы, то на зонной диаграмме эти процессы будут отражены прямыми горизонтальными линиями.



Зонные диаграммы туннельного диода при прямом смещении:

***а*) участок 1; *б*) участок 2; *в*) участок 3**

Рассмотрим **вольт-амперные характеристики *p-n* перехода** в особом случае, когда энергия Ферми в электронном и дырочном полупроводниках совпадает или находится **на расстоянии ± *kT/q*** от дна зоны проводимости или вершины валентной зоны.

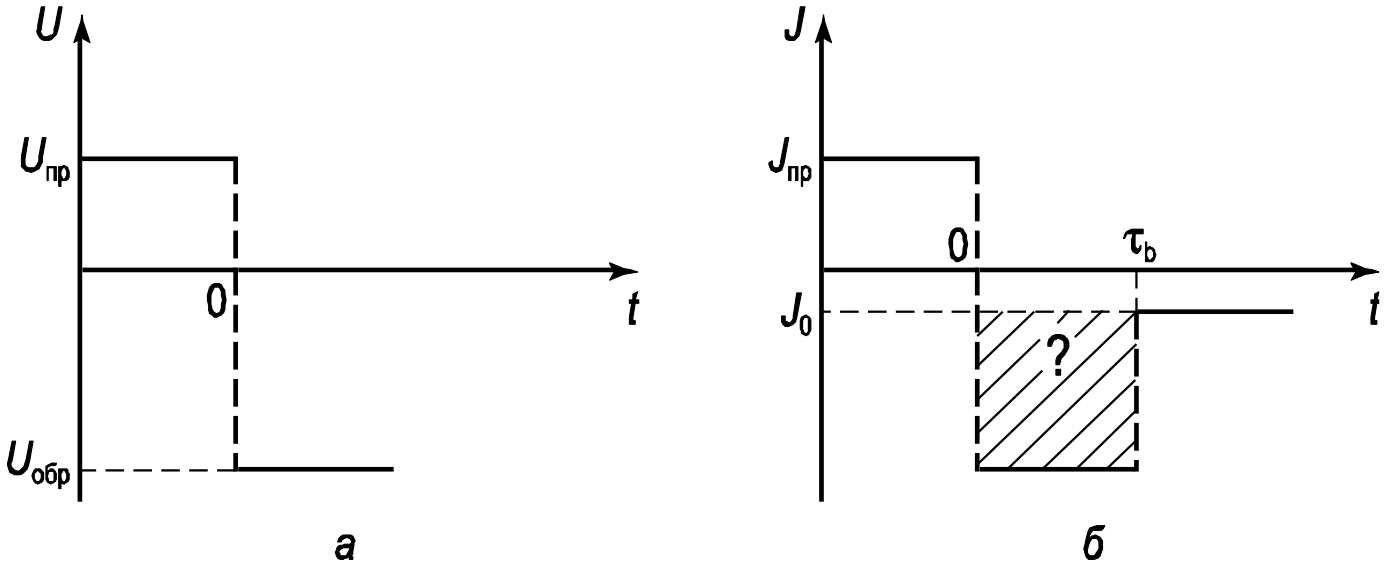


***а*) полная ВАХ;**

***б*) обратный участок ВАХ при разных температурах**

Переходные процессы в полупроводниковых диодах

При быстрых изменениях напряжения на полупроводниковом диоде на основе обычного *p-n* перехода значение тока через диод, соответствующее статической вольтамперной характеристике, устанавливается не сразу. Процесс установления тока при таких переключениях обычно называют переходным процессом. Переходные процессы в полупроводниковых диодах связаны с накоплением неосновных носителей в базе диода при его прямом включении и их рассасывании в базе при быстром изменении полярности напряжения на диоде. Так как электрическое поле в базе обычного диода отсутствует, то движение неосновных носителей в базе определяется законами диффузии и происходит относительно медленно. В результате кинетика накопления носителей в базе и их рассасывание влияют на динамические свойства диодов в режиме переключения



Эпюры изменения напряжения и тока при переключении диода: *а*) напряжение; *б*) ток

Выводы лекции:

Изучение физики работы туннельных и обращённых диодов позволяет сделать следующие ключевые выводы:

Квантовая природа проводимости: В отличие от классических полупроводниковых приборов, работа туннельных и обращённых диодов основана не на диффузионно-дрейфовом переносе носителей заряда, а на квантовомеханическом туннельном эффекте — прохождении электронов сквозь потенциальный барьер p"–" n-перехода без изменения их энергии.

Роль сильного легирования: Условием возникновения туннельного тока является вырождение полупроводника (сверхвысокая концентрация примесей, порядка 10^19–10^20 ⟦" см" ⟧^(−3)), что приводит к сужению области пространственного заряда до единиц нанометров и смещению уровней Ферми в разрешённые зоны.

Специфика ВАХ туннельного диода: Вольтамперная характеристика туннельного диода является N-образной и содержит участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением (ОДС). Наличие ОДС позволяет использовать прибор для генерации и усиления сверхвысокочастотных (СВЧ) сигналов, а также в сверхбыстродействующих импульсных и переключающих схемах.

Принцип работы обращённого диода: Обращённый диод представляет собой разновидность туннельного диода с меньшей степенью легирования (на границе вырождения). У него отсутствует участок ОДС на прямой ветви ВАХ, а ток при обратном смещении (за счёт туннелирования) значительно превышает ток при прямом смещении в области малых напряжений.

Сравнительная эффективность и применение: Туннельный диод выигрывает в задачах генерации СВЧ-колебаний и сверхбыстрого переключения логических состояний. Обращённый диод оптимален для детектирования и смешивания слабых СВЧ-сигналов при нулевом напряжении смещения, так как он обладает низким уровнем собственных шумов (отсутствует дробовой шум инжекции) и высокой температурной стабильностью.

Значение для наноэлектроники: Оба прибора демонстрируют практическое применение квантовых эффектов в твёрдом теле, обеспечивая пикосекундное быстродействие и закладывая фундаментальную базу для проектирования современных наноразмерных электронных компонентов.

Вопросы для контроля изучаемого материала:

1. В чём физическая сущность туннельного эффекта в p–n переходе?
2. Почему туннельный диод имеет участок отрицательного дифференциального сопротивления?
3. Как влияет концентрация примесей на толщину потенциального барьера?
4. Нарисуйте и объясните вольтамперную характеристику туннельного диода.
5. Чем обращённый диод отличается от обычного туннельного?
6. В каких областях применяются туннельные и обращённые диоды?
7. Каковы преимущества и ограничения этих приборов при высоких частотах?

Список литературных источников:

1.Соколова Т. Н. Физика конденсированного состояния. — М.: Лань, 2020.
2.Китаев В. П. Физика твёрдого тела. — М.: Физматлит, 2021.
3.Капустин А. П. Кристаллография, минералогия и физика твёрдого тела. — М.: МИСиС, 2020.
4.Kittel, C. Introduction to Solid State Physics. — Wiley, 2022.
5.Ashcroft, N. W., Mermin, N. D. Solid State Physics. — Cengage, 2019.