

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ТУННЕЛЬНОГО ДИОДА В ЛАБОРАТОРНОМ ПРАКТИКУМЕ ПО ФИЗИКЕ

Н.Я. Молотков, О.И. Гайнутдинов

Кафедра «Физика», ФГБОУ ВПО «ТГТУ», gainutdin49@mail.ru

Ключевые слова и фразы: вольтамперная характеристика; генерация колебаний; туннельный диод; туннельный эффект; *p-n*-переход.

Аннотация: Дано понятие о туннельном эффекте и рассмотрена проводимость туннельного полупроводникового диода. Описаны учебные эксперименты по исследованию вольтамперной характеристики туннельного диода и использованию его для генерации электрических колебаний.

Изучение студентами квантово-механических явлений часто становится затруднительным, так как эти явления не имеют наглядного классического аналога, а выводы, вытекающие из решения уравнения Шредингера, часто противоречат здравому смыслу. Одним из таких явлений может служить туннельный эффект. Студентам при его изучении в курсе физики предлагается исследовать свойства туннельного диода, получившего широкое применение в современной электронике.

Туннельный эффект состоит в том, что частица, первоначально локализованная по одну сторону потенциального барьера, то есть области, где потенциальная энергия частицы $U(x)$ превышает ее полную энергию E [$E < U(x)$], может с некоторой вероятностью проникнуть сквозь барьер и быть обнаруженной по другую его сторону. Туннельный эффект имеет квантовую природу, не имеющую аналога в классической механике, и обусловлен наличием у микрочастиц волновых свойств (волн де Бройля) и объясняется соотношением неопределенности Гейзенберга. Классическая частица не может находиться внутри потенциального барьера, так как соотношение $E = \frac{p^2}{2m} + U(x)$ удовлетворяется при $E < U(x)$ лишь при мнимых значениях импульса p -частицы. В применении же к микрочастице, обладающей как корпускулярными, так и волновыми свойствами, величины $U(x)$ и p не имеют одновременно определенных значений и могут отличаться от своих средних значений. Поэтому имеется отличная от нуля вероятность обнаружения микрочастицы внутри запрещенной с точки зрения классической физики области [1]. В случае прямоугольного потенциального барьера шириной d его прозрачность выражается формулой

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{2}{\hbar} \sqrt{2m(U - E)}d\right).$$

Аналогом туннельного эффекта в волновой оптике может служить «просачивание» световой волны в оптически менее плотную среду при условии полного внутреннего отражения. Это явление наглядно исследовано в диапазоне СВЧ при длине волны $\lambda = 3,2$ см [2].

Туннельный эффект возникает для основных носителей тока между p - и n -вырожденными полупроводниками. Уровень Ферми E_F в таких примесных полупроводниках проходит в зоне проводимости электронного n и в валентной зоне дырочного p полупроводников (рис. 1). Это приводит к тому, что зона проводи-

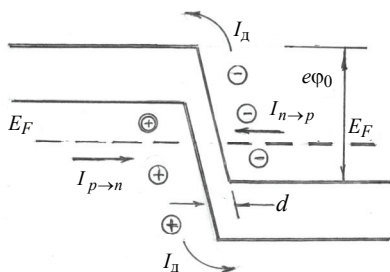


Рис. 1. Зонная модель p - n -перехода

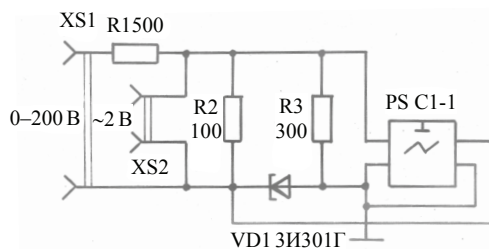


Рис. 2. Электрическая схема исследования туннельного диода

мости n -полупроводника перекрывается с валентной зоной p -полупроводника. В отсутствии внешнего напряжения на p - n -переходе для основных носителей тока в области контакта имеется потенциальный барьер высотой $e\phi_0$, ширина которого d имеет достаточно малое значение. Вследствие малой ширины d потенциального барьера в таком диоде возможен прямой туннельный эффект, когда, например, электрон без изменения энергии «перейдет» или «просочится» сквозь потенциальный барьер и займет «свободное место» по другую сторону от него. Следовательно, через перекрытые зоны p - n -перехода будут протекать или просачиваться две составляющие туннельного тока: одна составляющая $I_{n \rightarrow p}$ обусловлена потоком электронов из зоны проводимости n -полупроводника в валентную зону p -полупроводника, другая составляющая $I_{p \rightarrow n}$ обусловлена потоком дырок из валентной зоны p -полупроводника в зону проводимости n -полупроводника. За счет энергии теплового движения, которая не имеет верхнего предела, вследствие ее статистического распределения, некоторые основные носители могут преодолевать потенциальный барьер $e\phi_0$, то есть электроны зоны проводимости n -полупроводника могут переходить в зону проводимости p -полупроводника, а дырки из валентной зоны p -полупроводника могут переходить в валентную зону n -полупроводника. Такое движение основных носителей тока называют дрейфовым током. Внешнее напряжение, подаваемое на p - n -переход, влияет как на высоту потенциального барьера, так и на перекрытие зон и ширину барьера.

Схема экспериментального исследования вольт-амперной характеристики (ВАХ) туннельного диода ЗИ301Г показана на рис. 2. На зажимы XS2 подается переменное напряжение порядка 2...3 В. Напряжение U с диода подается на вход X осциллографа C1-1, а напряжение с резистора R3, которое пропорционально силе тока I , проходящего через диод, подается на вход Y того же осциллографа. Фотографические изображения экспериментальных ВАХ туннельного диода представлены на рис. 3.

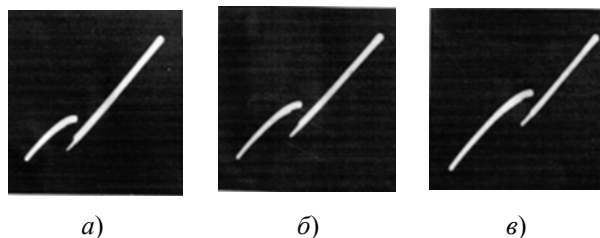


Рис. 3. Экспериментальные ВАХ туннельного диода без внешнего напряжения (а) и при его наличии (б, в)

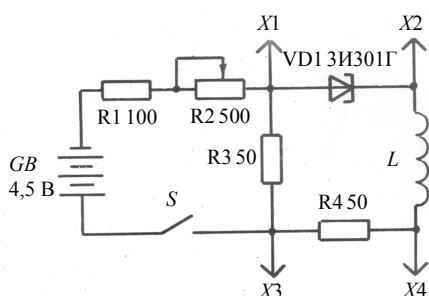


Рис. 4. Схема релаксационного генератора

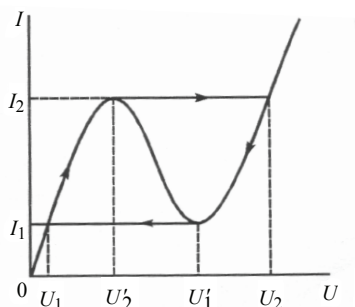


Рис. 5. Теоретическая ВАХ туннельного диода

Наблюдаемая характеристика (рис. 3, *a*) состоит из двух участков, обусловленных различным типом проводимости в зависимости от значения и знака приложенного напряжения. При отрицательном напряжении или небольшом положительном напряжении проводимость диода 3И301Г обеспечивается туннельным эффектом. При таких напряжениях зависимость силы тока от напряжения близка к прямо пропорциональной, то есть туннельный диод выполняет роль линейного элемента. Односторонняя проводимость в этом случае не наблюдается. При больших положительных напряжениях валентная зона полупроводника *p*-типа не перекрывается зоной проводимости полупроводника *n*-типа, вследствие чего туннельный ток становится невозможным. При достаточно больших положительных напряжениях на *p-n*-переходе проводимость обеспечивается дрейфовым током вследствие снижения потенциального барьера. При переходе от одного типа проводимости к другому наблюдается область (см. рис. 3, *a*), соответствующая падающему участку вольтамперной характеристики. При подаче на диод в прямом направлении дополнительного напряжения (зажимы X3, см. рис. 2) наблюдается смещение падающего участка (см. рис. 3, *b*, *в*).

В качестве примера использования туннельного диода рассмотрим работу релаксационного генератора (рис. 4). При замыкании ключа *S* сила тока, проходящего через туннельный диод и катушку индуктивности *L*, начинает возрастать. Когда этот ток превысит пиковое значение I_2 (рис. 5), напряжение скачком переходит от напряжения U_2' к напряжению U_2 . Параметры схемы выбраны так, что после такого увеличения напряжения на диоде сила тока начинает уменьшаться. Это уменьшение происходит до тех пор, пока сила тока не достигнет значения I_1 , после чего напряжение скачком падает от напряжения U_1' до U_1 . Затем ток опять начинает расти и цикл повторяется.

На рисунке 6 представлены диаграммы изменения во времени напряжения и силы тока при работе релаксационного генератора. Напряжение снимается с зажимов X1–X2 релаксационного генератора. Для исследования изменения силы тока, проходящего через диод, зажимы X3–X4 генератора соединяются с входом *Y* осциллографа. Диаграмма изменения силы тока имеет характерную пилообразную форму. Период повторения сигнала существенно зависит от индуктивности катушки.

Исследование колебаний, вырабатываемых генератором, основывается на построении фазовой диаграммы в координатах ($I, dI/dt$). Для этого напряжение с резистора *R4*, пропорциональное силе тока *I*, подается на вход *X* осциллографа, а напряжение с ка-

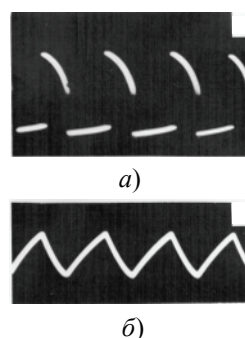


Рис. 6. Осциллограммы напряжения (*a*) и силы тока (*б*) при работе генератора

тушки индуктивности, пропорциональное величине di/dt , подается на вход Y того же осциллографа. В результате наблюдается требуемая фазовая траектория.

Описанные эксперименты предлагается использовать как в качестве лекционных демонстраций, так и в лабораторном практикуме по физике.

Список литературы

1. Соколов, А.А. Квантовая механика / А.А. Соколов, Ю.М. Лоскутов, И.М. Тернов. – М. : Учпедгиз, 1962. – 592 с.

2. Молотков, Н.Я. Учебные эксперименты по волновой оптике. СВЧ демонстрации : учеб. пособие / Н.Я. Молотков. – Долгопрудный : Интеллект, 2011. – 352 с.

Academic Studies of the Properties of Tunneling Diode

N.Ya. Molotkov, O.I. Gaynutdinov

Department "Physics", TSTU; gainutdin49@mail.ru

Key words and phrases: generation of oscillations; p-n-junction; tunnel diode; tunnel effect; volt-ampere characteristic.

Abstract: The paper examines the concept of tunneling effect and the conductivity of a semiconductor tunnel diode. The experiments of volt-ampere characteristic of tunnel diode and its application to generate electrical oscillations are described.

Lehrforschungen der Eigenschaften der Tunnelodiode im Laborpraktikum in der Physik

Zusammenfassung: Es wird der Begriff vom Tunneleffekt gegeben und wird die Leitfähigkeit der Tunnelhalbleiterdiode betrachtet. Es sind die Lehrexperimente nach der Forschung der Voltampercharakteristik der Tunnelodiode und ihrer Benutzung für die Erzeugung der elektrischen Schwingungen beschrieben.

Etudes académiques des propriétés de diode de tunnel dans la pratique de laboratoire sur la physique

Résumé: Est donnée la notion de l'effet de tunnel; est examinée la conductibilité de diode de semi-conducteur de tunnel. Sont décrits les expériences académiques sur les études de la caractéristique courant-tension de diode de tunnel et son utilisation pour la génération des oscillations électriques.

Авторы: *Молотков Николай Яковлевич* – доктор педагогических наук, профессор кафедры «Физика»; *Гайнутдинов Олег Инсафович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Физика», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

Рецензент: *Першин Владимир Федорович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Техническая механика и детали машин», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».