**Моделирование и оптимизация резонансно-туннельного диода**

Описание лабораторной работы

Составители: канд. физ.-мат. наук, доцент **Агарев В. Н.,** канд. физ.-мат. наук, доцент **Хазанова С. В.**, магистрант **Абросимов А. С.**, магистрант **Дегтярев В. Е.**

**Целью** настоящей работы является освоение компьютерного моделирования процессов туннелирования в резонансно-туннельного диоде и оптимизация его структуры.

**Введение**

Резонансно-туннельные диоды на основе полупроводниковых наноразмерных гетероструктур обладают *N*-образной вольт-амперной характеристикой с участком отрицательного дифференциального сопротивления и малой инерционностью процесса туннелирования (порядка 10-13 сек). Поэтому они представляют большой интерес для создания высокоскоростных приборов терагерцового диапазона и цифровых устройств с временем переключения порядка 10-12 сек и менее.

**Резонансное туннелирование в двухбарьерной структуре**

Туннелирование играет важную роль во многих полупроводниковых приборах*.* Резонансно-туннельный диод, предложенный впервые Иогансеном Л.В. [1, 2], представляет собой двухбарьерную структуру с квантовой ямой (рис.1). Важной характеристикой резонансно-туннельного диода является наличие падающего участка на вольтамперной характеристике, другими словами появления отрицательного дифференциального сопротивления (ОДС) или отрицательной дифференциальной проводимости (ОДП). С помощью ОДС можно скомпенсировать потери, вносимые в схему положительным сопротивлением. Это дает возможность его использования в работе усилителей, высокочастотных генераторов, преобразователей напряжения. Для простоты понимания работы подобного прибора можно ограничиться рассмотрением структуры с двумя барьерами и одной квантовой ямой. Качественное объяснение ВАХ основано на энергетической структуре квантовой ямы. Она представляет собой дискретную систему уровней размерного квантования. В общем случае, положение квантоворазмерных уровней и соответствующих им волновых функций в яме можно рассчитать, решая стационарное уравнение Шрёдингера. Волновые функции частиц, локализованных в яме не равны нулю на границах ямы, а плавно спадают вглубь барьеров. Таким образом, возможно туннелирование сквозь барьер.

В отсутствие напряжения, ток через структуру равен нулю. При приложении электрического поля потенциальный барьер для электронов снижается, и они могут туннелировать из слоя слева (эмиттер) в слой справа (коллектор).



**Рис.1.** Зонная диаграмма и вольтамперная характеристика резонансно- туннельного диода

Таким образом, будет заполняться нижний уровень в яме, лежащий ниже EF – уровня Ферми, ток при этом будет медленно расти. При дальнейшем увеличении напряжения, уровни в яме двигаются вниз по шкале энергии относительно уровня Ферми. При некотором напряжении уровень Ферми попадает в резонанс (сравнивается по энергии) с подзоной размерного квантования. Тогда электроны могут резонансным образом туннелировать в яму, затем выйти из нее, протуннелировав через второй барьер. Это приводит к резкому возрастанию туннельного тока. Данное явление называется резонансным туннелированием. При дальнейшем повышении напряжения, туннельный ток резко падает, создавая, таким образом, область с отрицательным дифференциальным сопротивлением (см. рис.1). Далее, повышая напряжение, при совпадении уровня Ферми со следующим уровнем размерного квантования в яме, эффект повторяется. Таким образом, можно наблюдать осцилляции туннельного тока. Расстояние между максимумами будет пропорционально расстоянию между уровнями в яме. В дальнейшем, идея создания ОДС в полупроводниковых структурах получила свое продолжение для сверхрешеток.

Крайние слои резонансно-туннельного диода являются высоколегированными, и к ним присоединяются омические контакты. В результате развития технологии молекулярной эпитаксии такие структуры стало возможным создавать на основе гетеропереходов GaAs/AlxGa1-xAs [3, 4]. Высота барьеров в таких структурах изменяется по мере увеличения содержания Al от 0,25 эВ при x=0,3 до 1,35 эВпри х=1. Типичные ширины барьеров и ямы имеют значения 5÷10 нм.

Поскольку барьеры имеют конечную высоту, то электроны не полностью локализованы внутри ямы, и квазиуровни в яме имеют конечную ширину ΔЕ≈ħ/τn [5], где время релаксации

(1)

Частота классического движения в яме

D1, D2 – амплитуды прохождения через 1 и 2 барьеры,

|D1|2,|D2|2 –коэффициенты прохождения через 1 и 2 барьеры,

kn – волновой вектор, соответствующий квазиуровню в яме.

Для прямоугольных барьеров коэффициент прохождения через всю структуру вблизи энергии квазиуровня En приближенно можно представить

(2)

Максимальное значение |D|2=1 будет при Е=Еn и |D1|=|D2| согласно формуле (2).

На рис.(2-7) представлены результаты моделирования в пакете Mathematica. Метод расчета коэффициента прохождения в полупроводниковых наноструктурах изложен в [6]. Алгоритм расчета предложен в [7].



**Рис.2.** Модельный потенциал симметричной наноразмерной гетероструктуры.



**Рис. 3.** Зависимость коэффициента прохождения от энергии для симметричной структуры.

Из рисунка видно, что с увеличением энергии квазиуровня, возрастает и ширина пика коэффициента прохождения ΔЕ. При увеличении энергии туннелирования экспоненциально возрастают значения коэффициентов прохождения через барьеры |D1|2,|D2|2, что приводит к уменьшению , согласно формуле (1), и, поэтому, к увеличению ΔЕ.

**Влияние параметров структуры на вольтамперные характеристики.**

При наложении внешнего электрического поля изменяется форма и высота барьеров так, что амплитуды прохождения D1, D2 становятся разными, поэтому общий коэффициент прохождения |D|2 будет уменьшаться, согласно формуле (2) (рис. 4,5).



**Рис.4.** Вид модельного потенциала для симметричной структуры при напряжении смещения 0,2 В*.*



**Рис.5.** Коэффициент прохождения для симметричной наноструктуры при напряжении 0,2 В*.*

Изменяя высоту или ширину одного или двух барьеров можно добиться того, что при заданном значении напряжения коэффициент прохождения опять станет максимальным (риc. 6,7). Таким образом, увеличение высоты второго барьера фактически возвращает равенство коэффициентов прохождения D1 и D2, что приводит к результирующему увеличению коэффициента прохождения всей структуры согласно (2).



**Рис.6.** Модельный потенциал при напряжении смещения 0,2 В. Высота второго барьера увеличена до 0,56 эВ.



**Рис.7.** Коэффициент прохождения при напряжении смещения 0,2 В. Высота второго барьера увеличена до 0,56 эВ

Величина и ширина пика зависимости коэффициента прохождения от энергии определяют вид вольтамперной характеристики. При низких температурах, когда kT<<μ, где μ – уровень Ферми, ток через диод можно записать [8]:

(3)

Приближенно, при |D1|=|D2| (строго говоря, |D1| ≠ |D2| из-за разной высоты и формы барьеров при подаче напряжения) из (2) и (3) получим [5]:

(4)

Основными параметрами вольтамперной характеристики, определяющими рабочие характеристики резонансно-туннельного диода являются отношение максимального и минимального (после падающего участка) тока и максимальное значение отрицательной дифференциальной проводимости gmax.

Интеграл (4) берется аналитически, откуда можно получить следующие оценки:

(5)

(6)

Максимальный ток, как видно из выражения (5), пропорционален ширине квазиуровня ( ) , а не зависит от . Эти выводы получены в приближении |D1|=|D2|, поэтому реальные значения и могут более сложным образом зависеть от параметров структуры.

**Порядок выполнения работы**

Целью работы является моделирование и оптимизация структуры резонансно‑туннельного диода. Исходная структура состоит из двух барьеров высотой 0,4 эВ, шириной 4 нм , ширина ямы 7 нм . Моделирование коэффициента прохождения выполнить в пакете Mathematica согласно методике, изложенной в [6]. Для предложенной структуры рассчитать:

1. Зависимость коэффициента прохождения от энергии.
2. Наложить на барьерный потенциал линейное электрическое поле и рассчитать зависимость максимального коэффициента прохождения от приложенного напряжения.
3. Принять внешнее напряжение постоянным (0,2 ÷ 0,3 В) и рассчитать зависимость коэффициента прохождения от ширины и высоты второго барьера. Найти параметры барьера при которых |D|2 ≈1.
4. Рассчитать вольтамперные характеристики для симметричной структуры пользуясь выражением (3).
5. Рассчитать вольтамперные характеристики при изменении ширины и высоты второго барьера. Найти оптимальные параметры барьера.

**Вопросы для подготовки допуска**

1. Квазиуровни в квантовой яме с конечными барьерами.
2. Резонансное туннелирование через симметричную наноструктуру.
3. Влияние внешнего электрического поля на коэффициент прохождения в симметричной структуре.
4. Влияние параметров барьеров на коэффициент прохождения.
5. Вольтамперные характеристики резонансно-туннельного диода.

**Литература**

1. Иогансен Л.В. ЖЭТФ, т.45, вып.2, с.2207, 1963.
2. Иогансен Л.В. УФН, т.86, вып.1, с.175, 1965.
3. Tsu R., Esaki L. Appl.Phys.Lett., 22, 562, 1972.
4. Chang L.L., Esaki L.,Tsu R. Appl.Phys.Lett., 24, 593, 1974.
5. Демиховский В.Я., Вугальтер Г.А. Физика квантовых низкоразмерных структур. М., «Логос», 2000.
6. Агарев В.Н. Моделирование резонансного туннелирования в полупроводниковых наноструктурах. ННГУ, Фонд образовательных электронных ресурсов, 2008.
7. Сатанин А.М. Численные методы в нанофизике. Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2006.
8. Драгунов В.П., Неизвестный И.Г., Гридчин В.А. Основы наноэлектроники: Учеб. Пособие, Новосибирск,