Исследования гетероструктур с квантовой ямой и дельта-легирующим слоем методами адмиттансной спектроскопии

Я.В. Иванова, В.И. Зубков

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация: В настоящей работе приводятся результаты экспериментальных и теоретических исследований гетероструктур (ГС) с квантовой ямой (КЯ) InGaAs/GaAs, содержащих дельта-слой углерода. Такой способ легирования активно используется в производстве СВЧ устройств, например, в НЕМТ-транзисторах. Проведена серия адмиттансных измерений для образцов с одиночной ямой, одиночным дельта-слоем, а также системой из КЯ и дельта-слоя с целью исследования особенностей процессов эмиссии носителей заряда и влияния дельта-легирующего слоя на ВФХ. С помощью численного моделирования путем самосогласованного решения уравнений Шредингера и Пуассона был определен профиль дна зоны проводимости и рассчитаны уровни размерного квантования. Методом решения внутренней задачи была рассчитана туннельная прозрачность системы. Показано, что дельта-слой существенным образом модифицирует потенциал вблизи ямы, меняя как положение связанного уровня в КЯ, так и туннельную прозрачность системы.

Ключевые слова: квантовая яма, GaAs, InGaAs/GaAs/AlGaAs, туннелирование, самосогласованное решение уравнения Шредингера и Пуассона, эмиссия носителей заряда, спектроскопия адмиттанса, полная проводимость, $B\Phi X$

1. Введение

Современные полупроводниковые приборы микро- и наноэлектроники представляют собой сложные системы, состоящие из слоев различного состава и легирования. Обычно в процессе создания полупроводниковых структур применяют объемное легирование слоев, составляющих структуру, т.е. легирующая примесь равномерно распределена по толщине слоя (в разных слоях количество легирующей примеси может быть различно). В ряде случаев более эффективно применение дельталегирования. В случае дельта-легирования легирующая примесь занимает узкую пространственную область в полупроводниковой матрице (ширина области несколько нанометров).

В случае дельта-легирования легирующая примесь занимает узкую пространственную область в полупроводниковой матрице (ширина области несколько нанометров). В этом случае профиль легирования (распределение примеси вдоль оси z) может быть описан дельта - функцией, где - двумерная плотность распределения примеси. При дельта-легировании профиль легирования уже, чем область локализации волновой функции носителей заряда. В частности, в GaAs пространственная величина электронной волновой функции в GaAs составляет 5-10 нм, профиль легирования может хорошо описываться дельта-функцией при толщине легирующего слоя < 3 нм [1].

Носители заряда, образовавшиеся при ионизации примеси, удерживаются зарядом ионов вблизи плоскости слоя примеси. В плоскости примесного слоя носители заряда ведут себя подобно свободным носителям. В то же время в направлении, перпендикулярном плоскости слоя, существует неоднородный (V-образный) электростатический потенциал, носящий характер потенциальной ямы для носителей

заряда. Пространственное ограничение волновых функций в V-образной потенциальной яме приводит к возникновению эффектов квантования. На рисунке 1 представлено схематическое изображение V-образной потенциальной ямы дельталегированного слоя и квантованного энергетического спектра в [2,3]

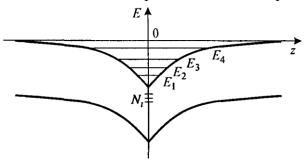


Рисунок 1. Схематическое изображение V-образной потенциальной ямы дельталегированного слоя и квантованного энергетического спектра [10]

Дельта-легирование позволяет увеличить локальную концентрацию носителей заряда (до 10¹⁴ см-2). При расположении рядом с квантовой ямой (в частности КЯ InGaAs) дельта - легированный слой может являться эффективным поставщиком носителей заряда в область КЯ, что, например, позволяет увеличить эффективность излучательной рекомбинации носителей в КЯ. Количество носителей, перешедших из области дельта-слоя в область квантовой ямы зависит от расстояния между дельта-слоем и КЯ и от температуры. С понижением температуры увеличивается степень локализации носителей в дельта-слое, что уменьшает вероятность перехода носителей в КЯ. Увеличение расстояния также уменьшает вероятность перехода носителей заряда из области дельта-слоя в КЯ. Однако сильное уменьшение расстояния между дельта-слоем и КЯ может ухудшить кристаллическое совершенство гетероперехода GaAs/InGaAs, что приведет к увеличению количества центров безызлучательной рекомбинации. В настоящей работе приводятся результаты исследований структур с КЯ и дельта-легирующими слоями методами адмиттансной спектроскопии.

2. Подготовка образцов и экспериментальные результаты

Для исследования влияния положения дельта-легирующего слоя на характеристики структуры, были проведены адмиттансные измерения серии образцов – содержащих одиночный дельта-слой, одиночную КЯ, а также комплекс из КЯ и дельта-слоя. Структура получена в НИФТИ ННГУ методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений (МОС) при атмосферном давлении водорода – газаносителя паров МОС.

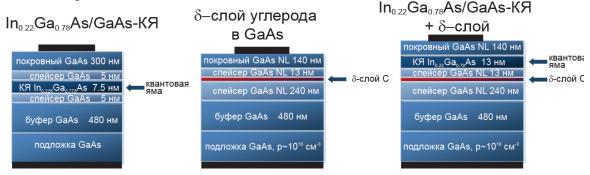


Рисунок 2. Структура исследуемых образцов

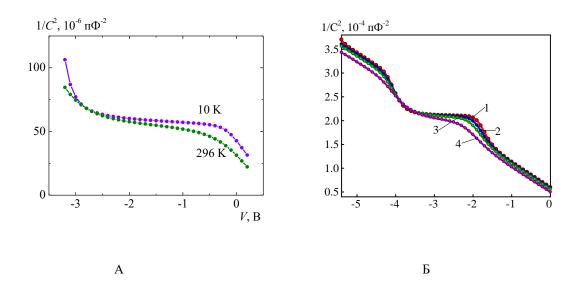


Рисунок 3. Вольт-фарадные характеристики исследуемых образцов: А- для одиночного дельта-слоя; Б — для одиночной КЯ при разных температурах (1 - 105 K, 2 - 155 K, 3 200 K, 4 - 300 K)

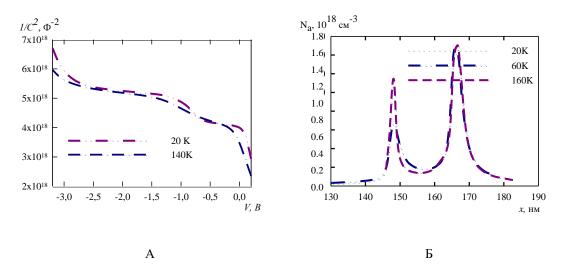


Рисунок 4. Вольт-фарадные характеристики (A) и профили концентрации подвижных носителей заряда (Б) для структуры с одиночной КЯ и дельта-слоем углерода

Для моделирования поведения дельта-легированного слоя проводился расчет методом самосогласованного решения уравнений Шредингера и Пуассона в квантовом ящике [4]. Принималось, что слой имеет толщину 3 нм, а объемная концентрация в пределах слоя варьировалась в диапазоне 1·1017 – 5·1018 см-3. Было показано, что положение уровня Ферми не зависит от мощности заряда в дельта-слое, что и ожидалось, поскольку положение уровня Ферми в структуре определяется толстым слоем электронейтрального образца. На этом фоне вклад дельта-слоя (или КЯ и дельта-слоя) составляет менее 0.1% по толщине структуры. Таким образом, можно утверждать, что дельта-легированный слой не оказывает существенного влияния на интегральные электрофизические характеристики структуры. Действие дельта-слоя оказывается эффективным только на расстоянии порядка одной - двух дебаевских длин. Если на этом расстоянии размещается КЯ, то этот слой ведет себя как эффектный поставщик дополнительных подвижных носителей заряда. Для исследования

перераспределения носителей заряда между КЯ и дельта-слоем с изменением температуры проводились CV-измерения модельных структур, содержащих КЯ InGaAs шириной 10 нм и дельта-слой углерода, удаленный от КЯ на расстояние 13 нм. Образцы (Рисунок 1В) также получены в НИФТИ ННГУ методом МОСVD при атмосферном давлении водорода — газа-носителя паров МОС. По экспериментальным CV-характеристикам (рисунок 5A) были рассчитаны профили концентрации основных носителей заряда при соответствующих температурах (Рисунок 6).

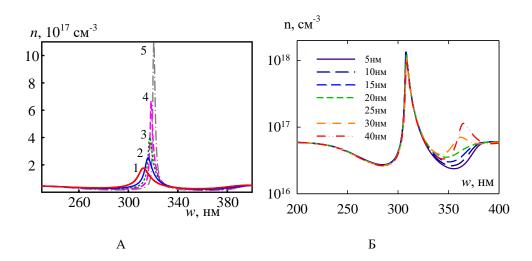


Рисунок 2. Наблюдаемый профиль концентрации основных носителей заряда в Γ C с KЯ InGaAs/GaAs (x = 0.225, ширина ямы 7.4 нм) при различных температурах, K: 1 – 300, 2 – 250, 3 – 200, 4 – 155, 5 – 75; Б - График моделирования наблюдаемого профиля концентрации носителей заряда для структуры с КЯ и дельта-слоем углерода при различных расстояниях между ними (температура 200К)

Для структуры с одиночной КЯ InGaAs/GaAs увеличение температуры от 75 до 250 К приводило к значительному (порядка 5 раз) уменьшению максимального значения пика концентрации основных носителей заряда, что, как связано с увеличением вероятности термоактивационного выброса носителей заряда из КЯ при повышении температуры. Для структуры с КЯ и дельта-легированным слоем наблюдается более слабое (менее 2-х раз) уменьшение амплитуды наблюдаемой концентрации основных носителей заряда при повышении температуры от 75 до 250 К. Это может являться следствием того, что дельта-слой углерода, расположенный рядом с КЯ, является поставщиком носителей заряда для КЯ. Это ослабляет носителей заряда, поскольку температурную зависимость концентрации повышением температуры наряду с увеличением вероятности термоактивационного выброса носителей из КЯ увеличивается вероятность захвата носителей из дельта-слоя в результате уменьшения степени локализации носителей заряда в области дельтаслоя. Понижение температуры приводит к усилению этого взаимодействия. Моделирование показало также, что при определенном расстоянии от КЯ до дельтаслоя (порядка 25 нм для КЯ шириной 10 нм и разрывом зоны проводимости 175 мэВ) на концентрационных зависимостях разрешаются отдельные пики для КЯ и дельтаслоя (Рисунок 6 Б). При уменьшении расстояния между КЯ и дельта-слоем наблюдается уменьшение величины пика для дельта-слоя и увеличение величины пика для КЯ, что связано с захватом носителей ямой. Данные предположения подтверждены температурными спектрами проводимости (Рисунок 7). Видно, что сигнал, превышающий шумы измерительного оборудования, получен только для образца с дельта-слоем и КЯ, тогда как одиночная КЯ не аккумулирует достаточный

заряд для получения значительной амплитуды пика в проводимости.

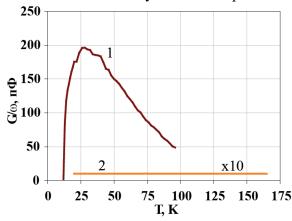


Рисунок 7. Температурные спектры проводимости для структур 1-c одиночной КЯ; 2-c КЯ и дельта-слоем углерода

Наличие дельта-легированного слоя рядом с КЯ не только влияет на заполнение ее носителями заряда, но также оказывает влияние на положение уровней квантования. На рисунке 8A представлена зависимость положения основного уровня квантования от расстояния между КЯ и дельта-легированным слоем, полученная при моделировании. Ранее нами было показано [5], что в легированных структурах,

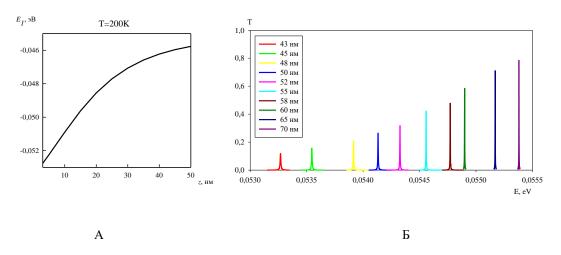


Рисунок 8. А- Зависимость положения уровня квантования для структуры с квантовой ямой и дельта-слоем углерода в зависимости от расстояния между КЯ и дельта-слоем. Температура 200 К, ширина квантовой ямы 10 нм; Б- коэффициент пропускания структуры в зависимости от расстояния между КЯ и дельта-слоем

содержащих КЯ, наряду с термоактивационным механизмом эмиссии может преобладать резонансно-туннельный, связанный с образованием квазистационарного состояния в верхней части ямы, где ввиду легирования образуется двухбарьерная структура. На величину его вклада существенно влияет симметрия барьеров. Для исследуемых в данной работе образцов с КЯ и дельта-слоем углерода был произведен расчет туннельной прозрачности для самосогласованного потенциала Хартри, полученного из решения уравнений Шредингера и Пуассона. Результат представлен на рисунке 8Б. Видно, что резонансно-туннельный механизм эмиссии имеет место быть, однако вклад его (то есть прозрачность структуры) резко уменьшается при приближении к КЯ дельта-слоя. Можно считать, таким образом, что для приборных применений дельта-слоя с КЯ расстояния обычно таковы, что вкладом резонансно-

туннельного механизма эмиссии можно пренебречь на температурах, близких к комнатной.

3. Заключение

Таким образом, в результате теоретического исследования установлено, что при расстоянии между КЯ и дельта слоем порядка не более одной – двух дебаевских длин дельта-слой является эффективным поставщиком носителей заряда в область КЯ. При этом видоизменяется потенциал в области КЯ и происходит изменение положения уровней квантования.

Список литературы

- V.I. Zubkov, M.A. Melnik, A.V. Solomonov [et l.] // Phys. Rev. B. 2004. Vol. 70, no. 7. P. 075312
- 2. Г.Е. Яковлев, В.И. Зубков // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2017. № 10. С. 5–12
- 3. Е.А. Тарасова, Е.С. Оболенская, А.В. Хананова, С.В. Оболенский, В.Е. Земляков, В.И. Егоркин, А.В. Неженцев, А.В. Сахаров, А.Ф. Цацульников, В.В. Лундин, Е.Е. Заварин, Г.В. Медведев. 2016. ФТП, 50, 1599
- 4. 4. Зубков, В.И. // ФТП. 2007. Т. 41, Вып. 3, с. 331-337
- 5. Я.В. Иванова, В.И. Зубков, А.В. Соломонов // ПЖТФ. 2018. №27. С. 112-120.