

ЛОКАЛИЗАЦИЯ НОСИТЕЛЕЙ В МНОГОСЛОЙНЫХ НАНОСТРУКТУРАХ, ОБУСЛОВЛЕННАЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ ПЕРЕДИСЛОКАЦИЕЙ ВОЛНОВЫХ ФУНКЦИЙ

Введение

В современной микроэлектронике и нанoeлектронике исследуется большое количество различных приборов с наноструктурами и сверхрешетками. По типу приборы могут принадлежать к различным частотным диапазонам и мощности, а по области применения – к пассивным, усилительным и генераторным. При этом каждый тип приборов использует свои разновидности наноструктур. Использование того или иного вида наноструктуры или сверхрешетки в качестве активной области полупроводникового прибора зависит от типа прибора и его параметров, которые предполагается достигнуть применением наноструктуры. Так же как и в обычных полупроводниковых приборах, в приборах нанoeлектроники основную роль в функционировании играют потоки заряженных частиц, зарядовые пакеты частиц различных типов и концентраций.

Создание наноструктуры в активной области того или иного полупроводникового прибора приводит к возникновению ряда искусственных потенциальных барьеров и ям, которые изначально задают энергетические и электрофизические свойства носителей [1]. Суммарное поле носителей, оказавшихся в активной области прибора, как в результате тепловой генерации, так и в результате согласованного направленного движения в результате внешнего полевого или любого другого вида воздействия, как правило, не оказывают существенного влияния на потенциальный рельеф наноструктуры. Характер движения носителей в области наноструктуры меняется по сравнению с обычным, объемным полупроводниковым прибором. Поэтому электрофизические свойства приборов с наноструктурами в основном определяются параметрами наноструктуры и ее воздействием на процессы генерации, накопления и рекомбинации носителей, а также на их направленное и тепловое движение [2, 3].

Так, например, в фотоприемниках различных типов и солнечных элементах с наноструктурами, обеспечивается пространственное разделение электронов и дырок с целью недопущения паразитной рекомбинации и повышения силы тока, получаемого от таких элементов. Кроме того, применение наноструктур позволяет наиболее полно охватить заданный диапазон длин волн, поглощаемого оптического излучения – как можно более широкого в случае солнечного элемента, и как можно более узкого – в случае датчика или монохромного фотоприемника [4].

В светодиодах и полупроводниковых лазерах наноструктуры способствуют образованию инверсной населенности, препятствуют паразитному боковому растеканию носителей, способствуют снижению порогового тока и формированию оптического волновода в активной области прибора для вывода генерируемого излучения, увеличению его направленности и снижению потерь на рассеяние в рабочем веществе [4, 5].

В электронных полупроводниковых приборах применение наноструктур позволяет более широко и качественно применять туннельный механизм переноса зарядов по сравнению с традиционными – объемными приборами. В приборах, использующих резонансное туннелирование электронов, – резонансно-туннельных диодах, резонансно-туннельных транзисторах, биполярных транзисторах со сверхтонкой туннельно-проницаемой базой и некоторых других, наноструктуры позволяют создавать N-образную вольтамперную характеристику с заданными величинами токов пика и долины, а также с заданной крутизной участка отрицательного дифференциального сопротивления [5].

В приборах с лавинным механизмом размножения носителей заряда наноструктуры способствуют локализации носителей в потенциальных ямах различных форм и размеров, а так-

же способствуют формированию ускоряющего или тянущего поля при подаче на прибор управляющего напряжения.

В любом конкретном применении той или иной наноструктуры определяющую роль играет суммарный самосогласованный потенциал всей совокупности потенциальных ям, барьеров, буферных, ограничивающих и разделительных слоев. При этом в самой наноструктуре ее элементы могут взаимодействовать между собой, порождая периодический сверхрешеточный потенциал, или располагаться на таком расстоянии друг от друга, которое исключает или существенно затрудняет их взаимодействие. Довольно часто на практике встречаются приборы, в которых имеются оба вида расположения элементов наноструктур. Кроме того, наноструктура может состоять из неповторяющихся как взаимодействующих, так и невзаимодействующих элементов или даже сверхрешеток с различными структурными параметрами. Корректное и полное моделирование таких наноструктур невозможно без выяснения степени взаимодействия и взаимного влияния элементов, составляющих наноструктуру друг на друга.

Данная статья посвящена исследованию взаимного влияния двух квантовых ям разделенных туннельно-прозрачным барьером.

Формирование энергетических спектров многослойных наноструктур

Как известно, энергетические спектры однослойных квантово-размерных структур, созданных на основе полупроводниковых гетеропереходов являются линейчатыми. Дискретизация спектра в этом случае достигается за счет взаимного влияния потенциальных барьеров гетеропереходов расположенных на малом расстоянии – на расстоянии ширины квантово-ограниченной области [2 – 4].

Спектры собственных значений энергии частиц в многослойных наноструктурах формируются по-разному. В том случае, если области квантового ограничения – квантовые ямы не взаимодействуют между собой (рис. 1, *a*), энергетические спектры наноструктур состоят из собственных значений отдельных квантово-ограниченных областей. В том случае, если области квантового ограничения взаимодействуют между собой через туннельно-прозрачные барьеры (рис. 1, *б*), энергетические спектры наноструктур представляют собой общие энергетические состояния всей структуры в целом, обусловленные взаимным туннелированием частиц через туннельно-прозрачные барьеры между квантово-ограниченными областями.

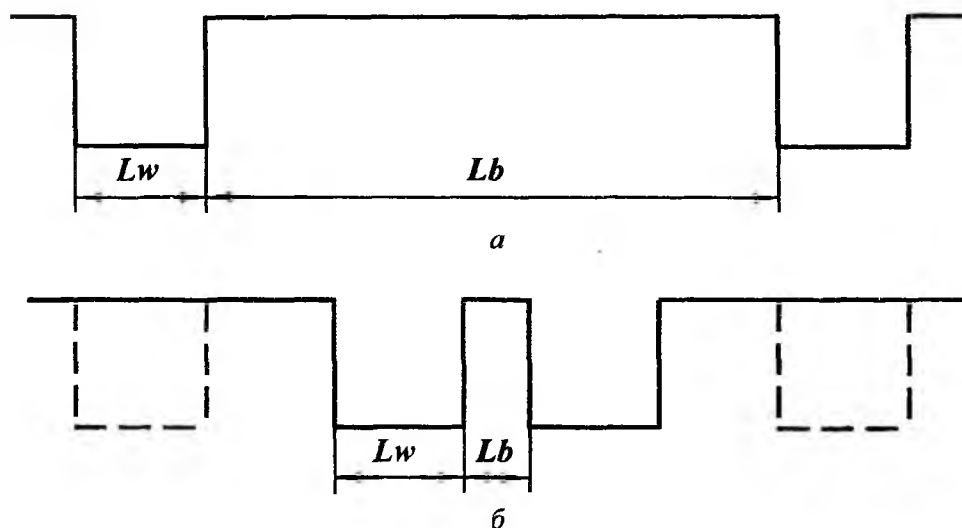


Рис. 1

Математическое описание собственных значений энергии частиц и соответствующих им собственных функций для обоих этих крайних случаев хорошо известно [1, 2, 5, 6].

Предложенные модели позволяют определять большое количество самых разнообразных параметров квантово-размерных структур и служить основой более разветвленных моделей

приборов с наноструктурами. Однако данные модели применительно к конкретным квантово-размерным структурам и сверхрешеткам имеют и ряд недостатков. В частности, они не позволяют получить общее решение для неодинаковых квантовых ям, разделенных туннельно-прозрачными потенциальными барьерами (рис. 2), а также корректно оценивать собственные функции частиц при увеличении непроницаемости потенциальных барьеров (ширины и энергетической высоты) вплоть до состояния полностью невзаимодействующих квантовых ям (рис. 1, а).

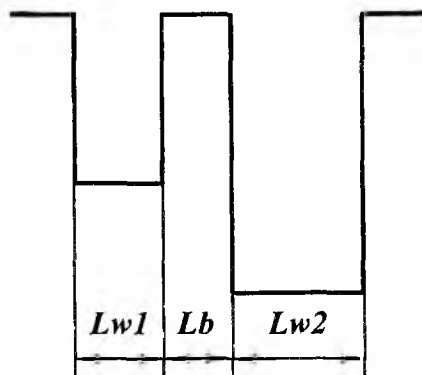


Рис. 2

Таким образом, с точки зрения проектирования многослойных наноструктур и сверхрешеток, производства приборов нанoeлектроники на их основе, а также теоретического и экспериментального исследования параметров и характеристик этих приборов, актуальна задача определения условий взаимодействия отдельных квантово-ограниченных областей в одной наноструктуре.

Иными словами, необходимо определить, при каких условиях – ширине и энергетической высоте разделительных барьеров, ширине квантово-ограниченных областей и степени их сходства – происходит взаимодействие между соседними квантово-ограниченными слоями. Свидетельством такого взаимодействия являются появление новых энергетических состояний в общем спектре наноструктуры, по сравнению со спектрами отдельных, невзаимодействующих квантово-ограниченных областей, смещение или группирование энергетических состояний, а также интерференционное перераспределение собственных функций частиц и квазичастиц, между взаимодействующими областями с квантовым ограничением.

Обоснование выбора модели

Для структур с симметричной энергетической диаграммой (рис. 1) собственные функции электронов в зоне проводимости, рассчитанные в соответствии с общим решением [1, 3, 4], показаны на рис. 2 и 3. Из анализа приведенных координатных зависимостей волновых функций электронов следует, что по мере увеличения ширины разделительного барьера между двумя ямами взаимодействие между ними уменьшается. Уменьшение взаимодействия выражается в вырождении энергетических уровней частиц, удвоенных в результате взаимного туннелирования из одного квантово-ограниченного слоя в другой через разделительный барьер. Однако амплитуды волновых функций с увеличением ширины разделительного барьера не уменьшаются, т.е. вероятность нахождения частиц по обе стороны от разделительного барьера одинакова как для «узкого» барьера, так и для «широкого» (поперечный размер разделительного барьера оценивается относительно поперечных размеров квантовых ям). Высоты ограничивающих и разделительного барьеров при расчетах выбирались равновысокими, соответствующими содержанию алюминия в материалах барьеров – $x = 0,5$.

Таким образом, при прочих равных условиях частицы при туннелировании через разделительный барьер различной ширины испытывают одинаковое рассеяние, что противоречит результатам экспериментальных исследований оптических свойств сверхрешеток [4] и кван-

тово-механической теории туннелирования частиц через потенциальные барьеры конечной высоты и ширины [1 – 3].

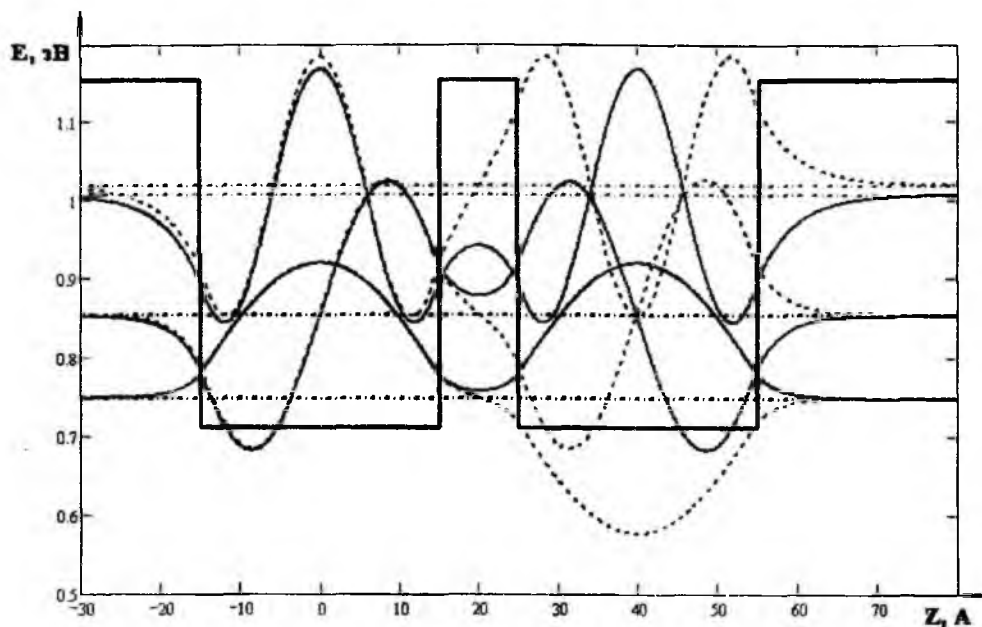


Рис. 3

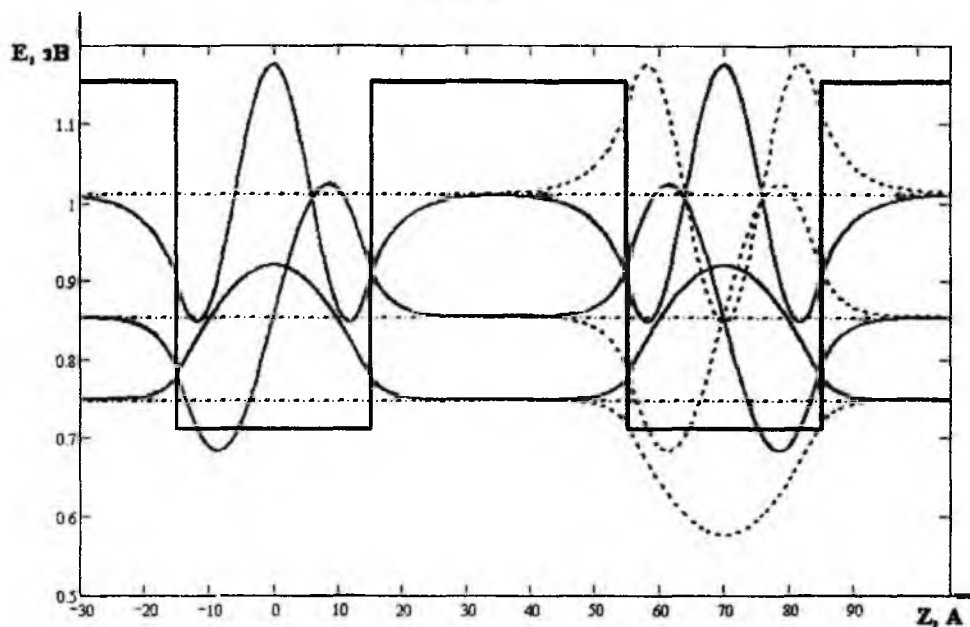


Рис. 4

На рис. 5 и 6 показаны результаты расчетов собственных значений энергии электронов в зоне проводимости двойной наноструктуры, и их собственных функций по методу малых возмущений.

Из анализа координатных зависимостей собственных функций электронов, рассчитанных для структуры с «узким» и «широким» разделительным барьером, следует, что по мере увеличения ширины разделительного барьера амплитуда волновых функций уменьшается, следовательно, в методе малых возмущений более адекватно учитывается процесс рассеяния частиц на барьере. Однако согласно данным, приведенным на рис. 5, удвоение энергетических уровней частиц отличается от аналогичного процесса, показанного на рис. 3. В отличие

от общего решения, согласно которому межуровневый интервал между удвоенными энергетическими уровнями монотонно возрастает с увеличением энергии состояния, при использовании метода малых возмущений межуровневый интервал является максимальным как раз для первых двух уровней, уменьшаясь и увеличиваясь по мере роста энергии состояния немонотонно. Аналогично изменяется и амплитуда волновых функций – согласно общему решению амплитуда волновых функций растет от состояния к состоянию по мере увеличения его энергии, согласно методу малых возмущений амплитуда волновой функции то увеличивается, то уменьшается в такт увеличению или уменьшению межуровневого интервала.

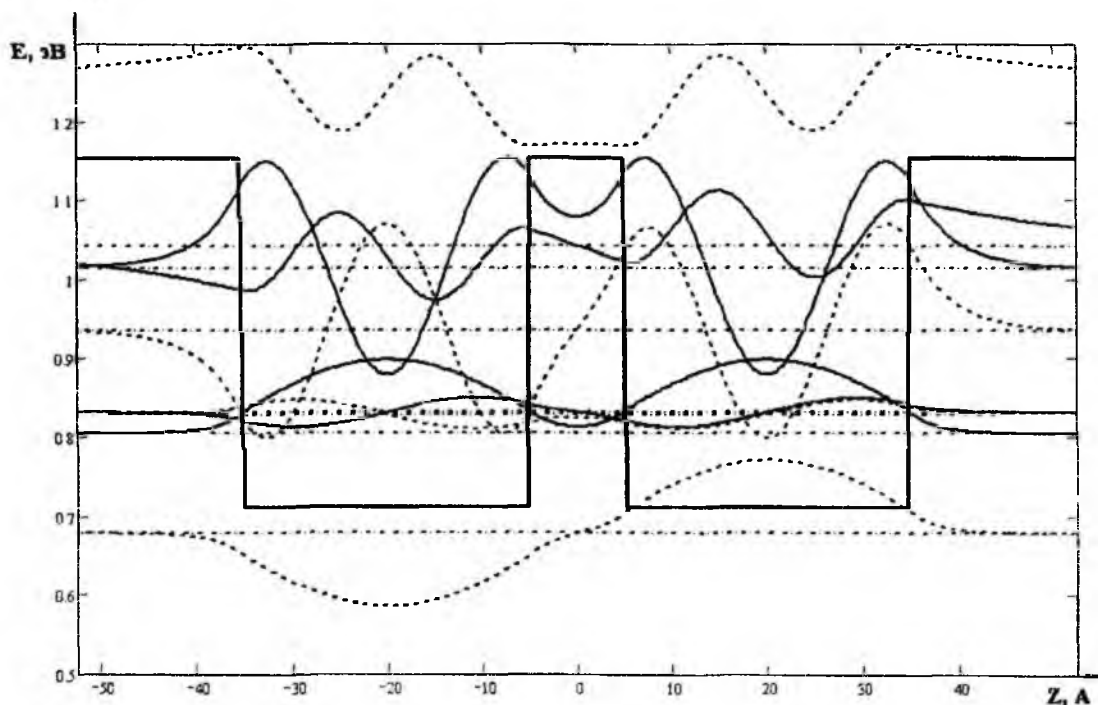


Рис. 5

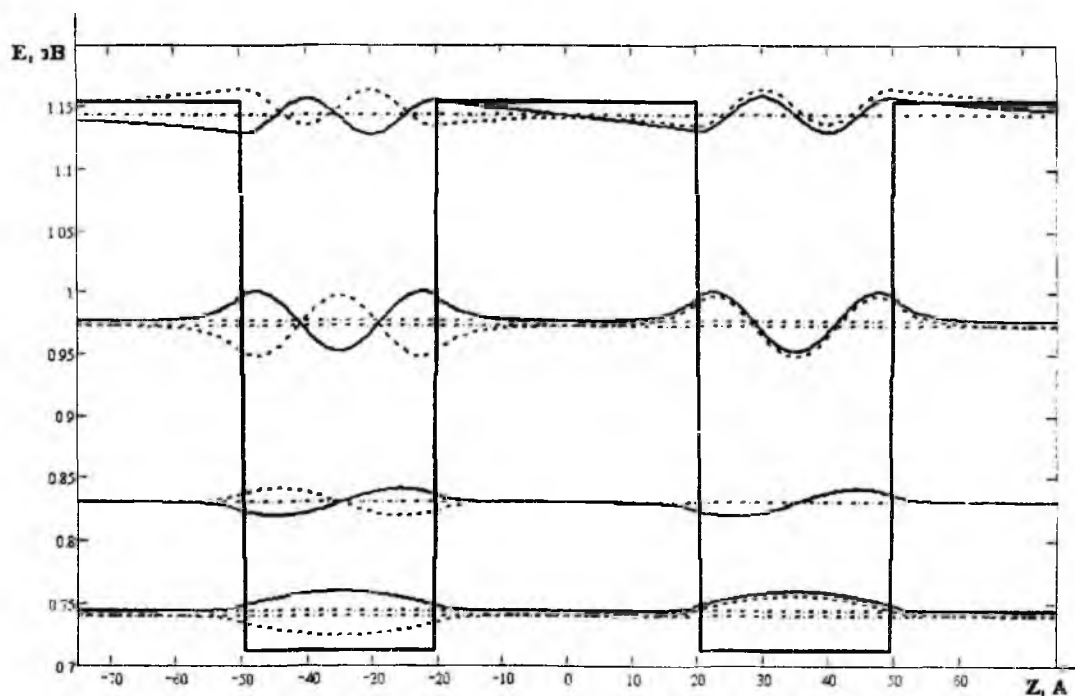


Рис. 6

Таким образом, метод малых возмущений позволяет адекватно моделировать интерференционную передислокацию волновых функций, и, следовательно, более полно описывать локализацию носителей в различных областях наноструктуры.

Список литературы: 1. Суханов А.Д. Лекции по квантовой физике: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 1991. – 383 с. 2. Андо Т. и др. Электронные свойства двумерных систем: Пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 416 с. 3. Флюгге З. Задачи по квантовой механике. – Т.1.: Пер. с англ. – М.: Мир, 1974. – 314 с. 4. Драгунов В.П., Неизвестный И.Г., Гридчин В.А. Основы наноэлектроники: Учеб. пособие. – М.: Логос, 2006. – 496 с. 5. Мартинес-Дуарт Дж.М., Мартин-Палма Р. Дж., Агулло-Рueda Ф. Нанотехнологии для микро- и оптоэлектроники. – М.: Техносфера, 2007. – 368 с. 6. Обухов И.А. Неравновесные эффекты в электронных приборах. – Севастополь: Вебер, 2010. – 303 с.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 15.02.2011