

## КВАНТОВОЕ ОГРАНИЧЕНИЕ ЧАСТИЦ В НАНОСТРУКТУРЕ С ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ ПРОФИЛЕМ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

### Введение

С развитием нанoeлектроники и ее полупроводниковой элементной базы исследователи все большее внимание уделяют созданию полупроводниковых нанoeлектронных приборов как оптоэлектронного так и неоптоэлектронного применения. При создании приборов нанoeлектроники возникает ряд проблем: встраивание дискретных нанoeлектронных приборов и их простейших сборок в состав стандартных микроэлектронных схем, имеющих устоявшуюся технологическую реализацию; создание чисто нанoeлектронных схем; создание надежных электрических соединений как между наноразмерными элементами схем, так и между нано- и микроэлектронными компонентами; температурная стабильность элементов нанoeлектроники; приведение параметров вновь создаваемой нанoeлектронной элементной базы к существующим стандартам на тот или иной вид аппаратуры, или создание новых стандартов; подавление нежелательных эффектов в работе новой элементной базы, возникновение которых связано с квантовой природой физических процессов, происходящих в активных областях нанoeлектронных приборов и т.д.

Наибольший интерес в создании и модернизации нанoeлектронной элементной базы представляет собой производство дискретных элементов оптоэлектронного и неоптоэлектронного применения, таких как инжекционные полупроводниковые лазеры и высоконаправленные светодиоды большой мощности, усилители и модуляторы оптического излучения, а также полевых транзисторов с наноканалом, резонансно-туннельных диодов, резонансно-туннельных транзисторов, биполярных транзисторов с наноразмерной базой. С развитием технологических методов нанoeлектроники, особое внимание уделяется созданию полупроводниковых приборов со сверхрешетками [1, 2].

В качестве основных материалов для создания полупроводниковых нанoeлектронных приборов чаще всего использовались двойные соединения  $A^{III}B^V$  и их тройных и четверных твердых растворов. Выбор этой группы материалов основан на широком их использовании в СВЧ полупроводниковой электронике. В последние пять-шесть лет внимание исследователей привлекают полупроводниковые соединения  $A^{IV}B^{VI}$  и их тройные и четверные соединения. Данная группа материалов также применялась для создания приборов полупроводниковой СВЧ электроники и оптоэлектроники, однако, поскольку данная группа материалов содержит большое количество летучих соединений, температурная нестабильность которых проявляется в технологически используемых диапазонах температур, создание качественных и резких  $p-n$  переходов на основе материалов данной группы было затруднительно. По этой причине приборы на основе соединений  $A^{III}B^V$  и, в особенности соединений  $A^{IV}B^{VI}$ , не получили широкого распространения, кроме отдельных образцов и серий приборов.

С развитием эпитаксиальных технологий появилась ранее недоступная возможность варьировать энергетическую диаграмму полупроводниковых структур как по ширине областей и высоте потенциальных барьеров, так и по направлениям роста кристаллов. Возникла возможность создавать структуры с чередующимися в заданном порядке материалами с различными электрофизическими и кристаллографическими свойствами. Появилось понятие «зонная инженерия», которое подразумевает искусственное получение материалов с несуществующими в природе электрофизическими свойствами.

Данная работа посвящена исследованию квазиконтинуальных состояний, которые возникают в многослойных квантово-размерных структурах, в том случае, когда внутренние потенциальные барьеры ниже внешних, между которыми и возникают энергетические состоя-

ния частиц, намного выше основных состояний в отдельных квантово-ограниченных областях и испытывающие также квантовое ограничение.

### Описание структуры

В качестве примера многослойной квантово-размерной структуры рассмотрена пятислойная структура, показанная на рис. 1. общий вид – рис. 1, а и энергетическая диаграмма – рис. 1, б. Структура создана на основе GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As. Материалы первого и пятого слоев М I, М V, состоят из твердого раствора Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As с максимальным содержанием алюминия, что обеспечивает наибольшую ширину запрещенной зоны в этих слоях. и. как следствие, самые высокие потенциальные барьеры для носителей обоих типов по всей структуре.

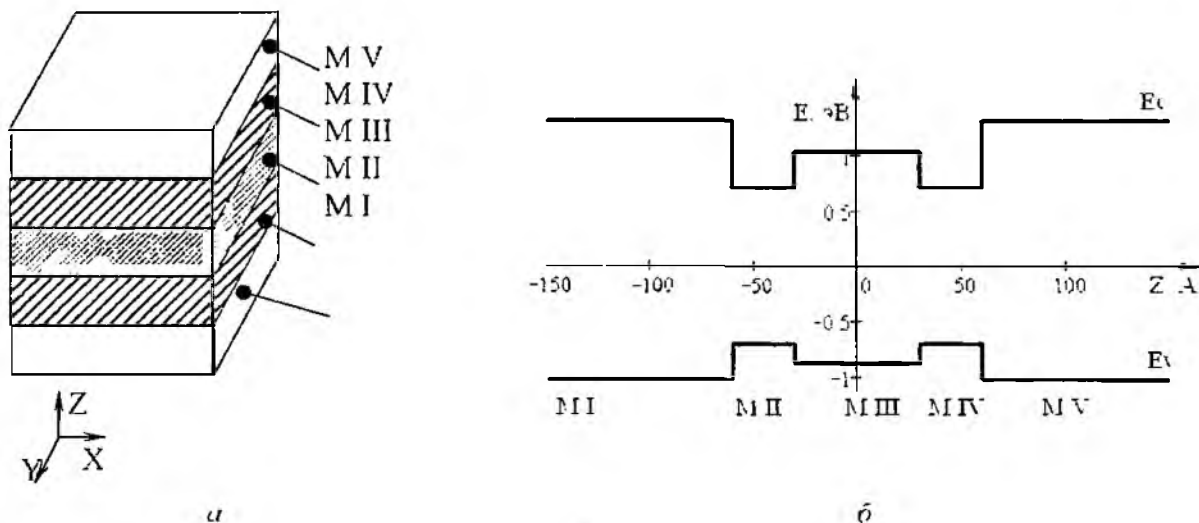


Рис. 1

Материалы второго и четвертого слоев – М II, М IV, наоборот, имеют минимальное содержание алюминия или полностью состоят из арсенида галлия. Этим обеспечивается формирование во втором и четвертом слоях прямоугольных квантовых ям для носителей обоих типов. В материале третьего слоя – М III содержание алюминия больше, чем в материалах второго и четвертого слоев, но меньше, чем в материалах первого и пятого слоев структуры. Таким образом, во втором, третьем и четвертом слоях над потенциальным барьером третьего слоя и между потенциальными барьерами первого и пятого слоев формируется зона квазиконтинуума, поскольку носители во втором и четвертом слое испытывают квантовое ограничение. их толщина не превышает длины волны де Бройля, толщина разделительного барьера также невелика поскольку барьер считается проницаемым, однако общее расстояние между барьерами первого и пятого слоев, в общем случае может приближаться к величинам объемного образца.

### Нахождение собственных состояний носителей в области квазиконтинуума

Определение собственных значений энергии и собственных функций носителей производится в рамках квантово-механического подхода на основании решения стационарного уравнения Шредингера [3]:

$$\hat{H}\Psi = E \cdot \Psi. \quad (1)$$

Решение уравнения (1) для области квазиконтинуума можно записать так:

$$\arctg\left(\frac{k_1 \cdot m_2^*}{k_2 \cdot m_1^*}\right) - \arctg\left(\frac{k_3 \cdot m_2^*}{k_2 \cdot m_3^*} \cdot \operatorname{tg}(k_3 \cdot a)\right) - k_3 \cdot (d - a) + n \cdot \pi = 0 \quad (2)$$

- для четных решений.

$$\arctg\left(-\frac{k_2 \cdot m_1^*}{k_1 \cdot m_2^*}\right) - \arctg\left(\frac{k_2 \cdot m_3^*}{k_3 \cdot m_2^*} \cdot \operatorname{tg}(k_3 \cdot a)\right) - k_3 \cdot (d - a) + n \cdot \pi \quad (3)$$

- для нечетных решений.

Уравнения (2) и (3) представляют собой трансцендентные уравнения относительно собственных значений энергии носителей. Результаты нахождения собственных значений энергии для электронов в зоне проводимости показаны на рис. 2, а. На рис. 2, б, показаны собственные функции электронов в стационарном состоянии, соответствующие собственным значениям энергии.

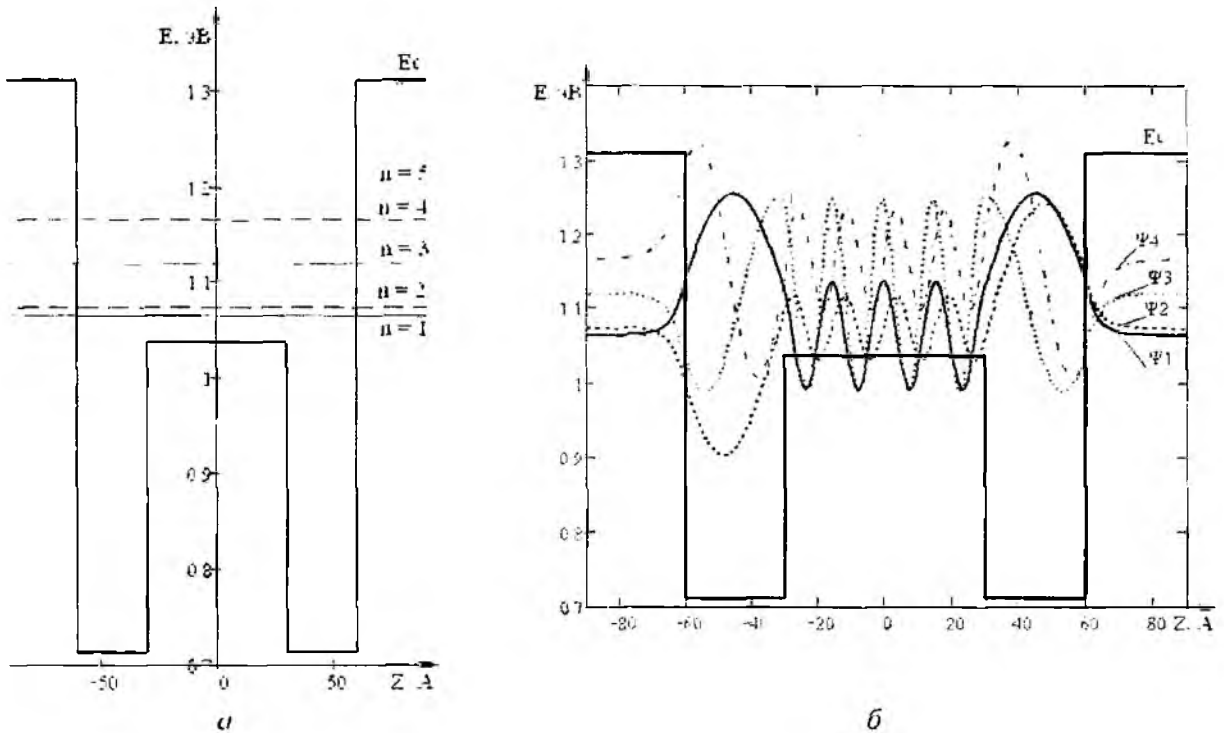


Рис. 2

### Влияние внешнего электрического поля на состояния носителей

При воздействии на квантово-размерную структуру с энергетическим профилем сложной формы внешнего электрического поля состояние частиц в области квазиконтинуума подвергается существенным изменениям, вызванных, с одной стороны, воздействием напряженности внешнего поля, с другой, - наличием у частиц в этой области дополнительной потенциальной энергии. Изменения, вызванные в структуре внешним электрическим полем можно относительно легко проследить, используя второе приближение теории возмущений. На рис. 3, а и б соответственно показаны собственные значения энергии и собственные функции электронов в зоне проводимости, рассчитанные для случая воздействия внешнего стационарного электрического поля. На рис. 3, а для сравнения показаны непрерывными линиями стационарные состояния электронов.

### Результаты исследования энергетического спектра частиц в наноструктуре с энергетическим профилем сложной формы

Анализ собственных значений и собственных функций носителей в квантово-размерной структуре с энергетическим профилем сложной формы, рассчитанных для стационарного состояния (рис. 2) и для случая воздействия внешнего стационарного электрического поля (рис. 3), позволяет сделать следующие выводы:

- в стационарном состоянии носители, находящиеся в области квазиконтинуума имеют

резко немонотонно возрастающий спектр собственных значений энергии и локализируются в области квантовых ям:

- частицы, находящиеся выше по энергии относительно первых двух состояний, локализируются во всем пространстве квазиконтинуума более равномерно;

- под действием внешнего постоянного электрического поля квантово-ограниченный эффект Штарка проявляется немного иначе, чем в однослойных структурах или симметричных многослойных структурах, здесь также внешнему воздействию наиболее подвержены первые два энергетических уровня, однако влияние внешнего поля проявляется более резко, в то время как для лежащих выше уровней это влияние почти незаметно;

- воздействие внешнего поля приводит также к существенной дelokализации носителей, расположенных на первых двух уровнях без изменения четности состояний.

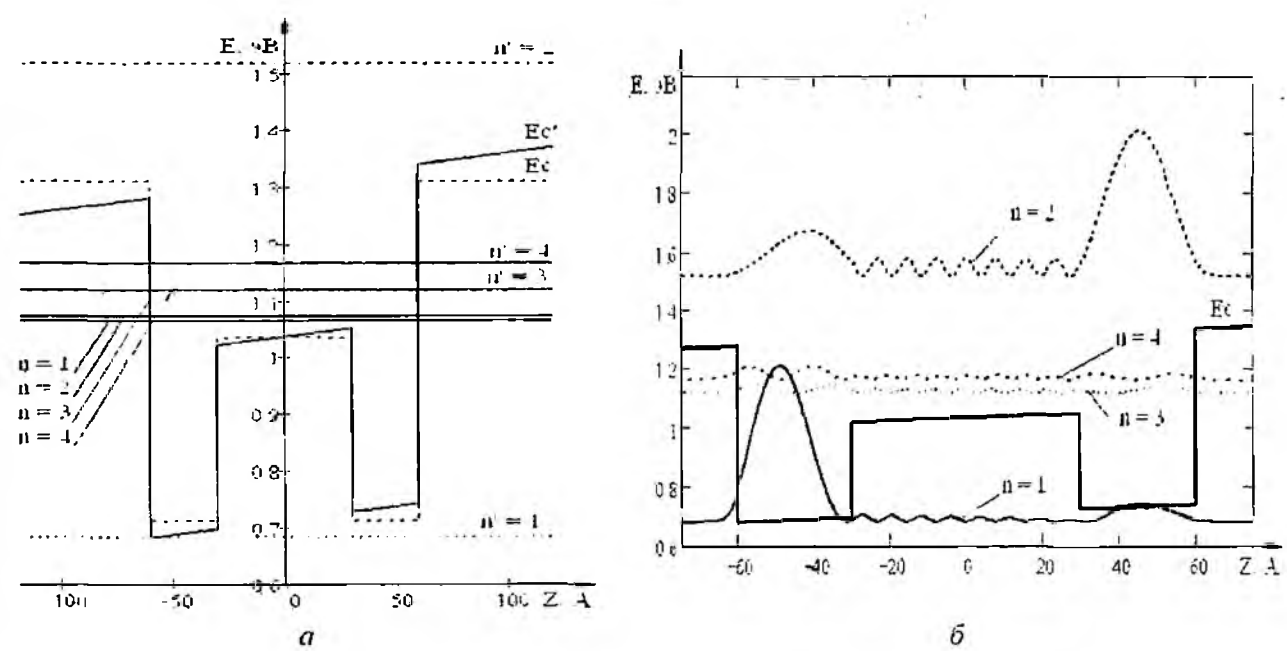


Рис. 3

**Список литературы:** 1. Пащенко А. Г. Энергетические состояния частиц в многослойных периодических наноструктурах // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2004. Вып. 136. 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.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 01.09.2008