

ДЕЛОКАЛИЗАЦИЯ ЧАСТИЦ В НАНОСТРУКТУРЕ С ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ ПРОФИЛЕМ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНЕГО ВОЗМУЩЕНИЯ

Пащенко А. Г.

*Харьковский национальный университет радиоэлектроники
Кафедра микроэлектроники электронных приборов и устройств
пр. Ленина, 14, Харьков, 61166, Украина
тел.: (8057) 702-13-62, e-mail: mepu@kture.kharkov.ua*

Аннотация — В работе рассмотрена наноструктура, энергетический профиль которой состоит из прямоугольной квантовой ямы и прямоугольного резонатора в ее центральной части. Показано влияние на энергетический спектр частиц параметров резонатора — высоты и ширины центральной части. Рассмотрена возможность использования наноструктуры со сложным энергетическим профилем в качестве активной области резонансно-туннельного диода.

I. Введение

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 нанoeлектронными 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 и т.д.

Наибольший интерес в создании и модернизации нанoeлектронной элементной базы представляет собой производство дискретных элементов оптоэлектронного и не оптоэлектронного 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. 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 $A^{II}B^{VI}$ и их тройные и четверные соединения. Данная группа материалов так же 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 $A^{II}B^{VI}$ 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. 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 состояния частиц, намного выше основных состояний в отдельных квантово-ограниченных областях и испытывающие также квантовое ограничение.

II. Описание структуры

В качестве примера многослойной квантово-размерной структуры в данной работе рассмотрена пятислойная структура, созданная на основе $GaAs/Al_xGa_{1-x}As$. Материалы первого и пятого слоев M I, M V, состоят из твердого раствора $Al_xGa_{1-x}As$ 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.

Материалы второго и четвертого слоев — M II, M 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 — M 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 проникаемым, однако общее расстояние между барьерами первого и пятого слоев, в общем случае может приближаться к величинам объемного образца.

III. 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].

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

При воздействии на квантово-размерную структуру с энергетическим профилем сложной формы внешнего электрического поля состояния 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.

Анализ собственных значений и собственных функций носителей в квантово-размерной структуре с энергетическим профилем сложной формы, рассчитанных, как для стационарного состояния, так и для случая воздействия внешнего стационарного электрического поля позволяет сделать следующие выводы:

- в стационарном состоянии носители, находящиеся в области квазиконтинуума имеют резко немонотонно возрастающий спектр собственных значений энергии и локализуются в области квантовых ям;

- частицы, находящиеся выше по энергии относительно первых двух состояний локализуются 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 вышележащих уровней это влияние почти незаметно;

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

IV. Список литературы

- [1] Пашченко А. Г. Энергетические состояния частиц в многослойных периодических наноструктурах // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч. — техн. сб. 2004. Вып. 136с
- [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.

PARTICLES DELOCALIZATION IN NANOSTRUCTURES WITH COMPLEX ENERGY PROFILE UNDER THE ACTION OF EXTERNAL PERTURBATION

Pashchenko A. G.

Kharkov National University of Radio Electronics
Department of Microelectronics
of Electronic Instruments and Devices
14, Lenin Ave., Kharkov, 61166, Ukraine
Ph.: (8057) 702-13-62
e-mail: mepu@kture.kharkov.ua

When creating the nanoelectronic devices, a number of problems arises: incorporation of discrete nanoelectronic devices and their simplest assemblies into the structure of the standard microelectronic circuits having the stable technological realization; creation of purely nanoelectronic circuits; creation of reliable electrical connections both between nanodimensional elements of the circuits and between nano- and microelectronic components; temperature stability of nanoelectronic elements; bringing of newly created nanoelectronic element base parameters to the existing standards on one or another kind of devices, or creation of new standards; suppression of undesirable effects in the operation of the new element base, their origin is connected with the quantum nature of the physical processes taking place in the active zones of nanoelectronic devices etc.

This work is devoted to research into quasi-continual states emerging in multilayer quantum-well structures, when the internal potential barriers are lower than the external ones, particles energetic states far above the main states in separate quantum-confined regions emerge between them and are also subjected to quantum confinement.

Finding of eigenvalues of energy and eigenfunctions of carriers is performed in the framework of the quantum mechanical approach based on solution of the steady-state Schrödinger equation [3]:

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

The state of particles in the quasi-continuum field is subjected to substantial variations caused, on the one hand, by the action of the external field intensity and on the other hand by the presence of additional potential energy in the particles of this field under the action of the external electric field on the quantum-well structure with a complex form of energy profile. Variations caused in the structure by the external electric field can be relatively easily traced using the second approximation of the perturbation theory.

Analysis of eigenvalues and eigenfunctions of carriers in the quantum-well structure with energy profile of a complex form calculated both for the steady state and for the case of the external steady electric field action, allows making the following conclusions:

- carriers in the steady state being in the field of quasi-continuum have sharply non-monotonously rising spectrum of eigenvalues of energy and are localized in the field of quantum wells;

- particles, being higher in energy relative to the first two states, are localized over the whole space of quasi-continuum more uniformly;

- quantum-confined Stark effect shows itself somewhat different than in one-layer structures or symmetric multilayer structures under the action of the external stationary electric field, here the two first energy levels are also the most subjected to the external action, but the action of the external field reveals itself more sharply while this action is almost imperceptible for upper layers;

- action of the external field results also in significant delocalization of carriers located on the first two levels without variation of the states parity.