

# ЛОКАЛИЗАЦИЯ НОСИТЕЛЕЙ В МНОГОСЛОЙНЫХ НАНОСТРУКТУРАХ, ОБУСЛОВЛЕННАЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ ПЕРЕДИСЛОКАЦИЕЙ ВОЛНОВЫХ ФУНКЦИЙ

Пащенко А. Г. Ванцан В. М.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники  
61166, Харьков, пр. Ленина, 14, каф. Микроэлектроники электронных приборов и устройств  
тел. (8057) 702-13-62, E-mail: [teru@kture.kharkov.ua](mailto:teru@kture.kharkov.ua)

*Аннотация* — В работе рассмотрена возможность определения собственных значений и собственных функций частиц и квазичастиц в туннельно-связанных квантовых ямах в приближении теории возмущений. Данный подход позволяет более адекватно описывать процесс взаимодействия между квантовыми ямами, особенно при увеличении ширины и энергетической высоты разделительного барьера.

## I. Введение

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 резонансно-туннельное 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 вели-

чинами токов пика и долины, а также с заданной крутизной участка отрицательного дифференциального сопротивления [5].

## II. Формирование энергетических спектров многослойных наноструктур

Спектры собственных значений энергии частиц в многослойных наноструктурах формируются по-разному. В том случае, если области квантового ограничения — квантовые ямы не взаимодействуют между собой 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 энергетические спектры наноструктур представляют собой общие энергетические состояния всей структуры в целом, обусловленные взаимным туннелированием частиц через туннельно-прозрачные барьеры между квантово-ограниченными областями.

Математическое описание собственных значений энергии частиц и соответствующих им собственных функций для обоих этих крайних случаев хорошо известны как в классической литературе [1, 2], так и в научных публикациях [5, 6].

Предложенные модели позволяют определять большее 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 а также корректно оценивать собственные функции частиц при увеличении непроницаемости потенциальных барьеров (ширины и энергетической высоты) вплоть до состояния полностью невзаимодействующих квантовых ям.

## III. Собственные функции и собственные значения энергии туннельно-связанных слоев

На рис. 1 показаны результаты расчетов собственных значений энергии электронов в зоне проводимости двойной наноструктуры, и их собственных функций по методу малых возмущений.

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

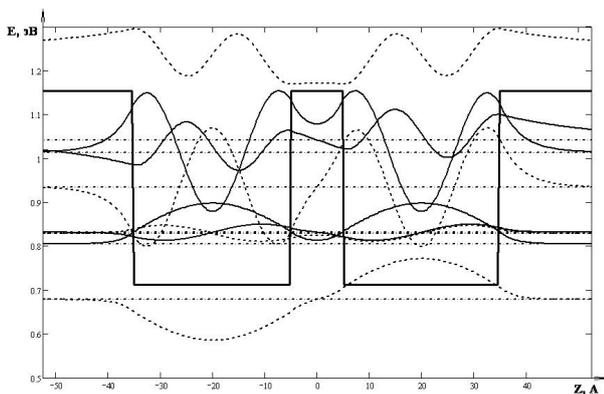


Рис. 1. Интерференция собственных функций и собственных значений в туннельно-связанных кантовых ямах рассчитанные в приближении теории возмущений.

Fig. 1. Interference of own functions and own values in the tunnel and connected quantum holes calculated in approximation to perturbation theories

#### IV. Заключение

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. 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 не монотонно. 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.

#### 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 нанозлектроники: Учебное пособие. – М.: Логос. 2006. – 496 с.
- [5] Мартинес-Дуарт Дж. М., Мартин-Палма Р. Дж., Агулло-Руеда 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.

## CARRIERS LOCALISATION IN THE MULTILAYER NANOSTRUCTURES STIPULATED BY INTERFERENCE REDISLOCATION OF WAVE FUNCTIONS

Pashchenko A. G. Vantsan V. M.

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

**Abstract** — The possibility to determine the eigenvalues and eigenfunctions of particles and quasi particles in the tunnel-linked quantum wells in the perturbations theory approximation is considered. The given approach makes it possible to describe the process of interaction between the quantum wells more adequately, particularly in the case when increasing the width and energy height of the dividing barrier.

#### I. Introduction

Spectra of the energy particles eigenvalues are formed variously in the multi-layer nanostructures. When the quantum restriction regions are quantum wells not interacting with each other, the nanostructure energy spectrum consists of eigenvalues of separate quantum-restricted regions. In the event that the regions of quantum restrictions interact with each other through the tunnel-permeable barriers, the energy spectra of nanostructure represents a general energy states of the structure as a whole caused by the mutual tunneling of particles through tunnel-permeable barriers between the quantum restriction regions.

#### II, III Paragraphs

It follows from the analysis of the mentioned coordinate dependences of the electron wave functions that as the dividing barrier width between two wells is increased, the interaction between them decreases. The decrease in the interaction is expressed in the degeneracy of particles energy levels doubled because of the mutual tunneling from one quantum-restricted level into another through the dividing barrier. However, the wave functions amplitudes do not decrease with the increase in the width of the dividing barrier, i.e. the probability of finding particles on each side of the dividing barrier is equal both for the “narrow” barrier and for the “wide” barrier (the cross section size of the dividing barrier is estimated relative to the quantum wells cross-section sizes).

#### IV. Conclusion

From the analysis of the coordinate relations of electrons eigenfunctions, calculated for the structure with “narrow” and “wide” dividing barriers, it follows that as the width of the dividing barrier increases, the amplitude of the wave functions decreases, hence, the process of the particles scattering on the barrier is considered more adequately in the perturbation method. Contrary to the general solution, according to which the interlevel interval between the doubled energy levels monotonously increases with the increase in the state energy, when using the perturbation method the interlevel interval is the maximal one just for the first two levels decreasing and increasing not monotonously as the state energy increases. The wave functions amplitude varies similarly – according to the general solution the wave functions amplitude increases from the state to the state, as its energy increases according to the perturbation method; the wave function amplitude either increases or decreases in step with the increase or decrease in the interlevel interval.