

А. Г. ПАЩЕНКО, канд. физ. -мат. наук, В.М. ВАНЦАН, канд. физ.-мат наук

ФОРМИРОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА МНОГОСЛОЙНОЙ СИММЕТРИЧНОЙ КВАНТОВОРАЗМЕРНОЙ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ GaAs/Al_{x1}Ga_{1-x1}As/Al_{x2}Ga_{1-x2}As. Часть 2. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Расчёты собственных значений энергии носителей, проведенные в [1] по формулам (35) – (38), позволяют детально проанализировать влияние квантово ограниченных барьерных слоёв на центральный (активный) слой рассматриваемой квантоворазмерной структуры (КРС). В многослойных (в данном случае трёхслойных КРС) наибольший интерес с точки зрения изучения их электрооптических свойств представляет изучение влияния полупроводниковых ограничивающих слоёв, в которых так же, как и в активном слое, наблюдается квантоворазмерный эффект, на формирование энергетического спектра носителей в активном слое и на распределение носителей по уровням энергии. На рис. 1 показана полная система энергетических уровней электронов на фоне энергетического профиля зоны проводимости в области квантового ограничения.

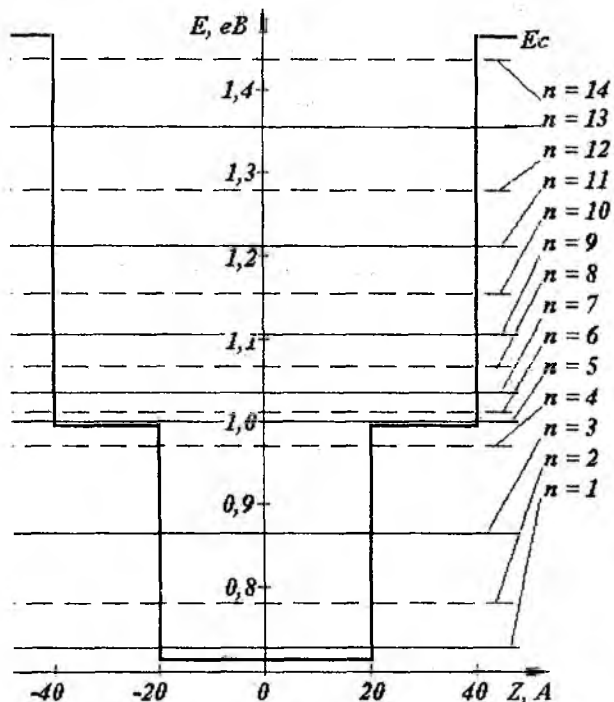


Рис. 1

Расчёты собственных значений энергии проводились в [1] без учёта влияния полей объёмных зарядов, что допустимо для случая невырожденных полупроводниковых материалов, входящих в КРС, поэтому форма потенциальных барьеров на границе раздела различных материалов может быть принята прямоугольной, как показано на рис. 1. Аналогичные допущения приводились и при расчёте собственных значений энергии носителей в однослойных симметричных [2, 3, 4] и несимметричных [5, 6] КРС как в стационарном состоянии, так и при воздействии на КРС постоянного электрического поля, векторы напряженности которого направлены перпендикулярно плоскостям квантового ограничения [5, 6, 7, 8].

Распределение энергетических уровней электронов в структуре, показанной на рис. 1, сочетает в себе признаки распределения как «узких» квантовых ям с «низкими» потенциальными барьерами, так и «широких» ям с «высокими» потенциальными барьерами [3, 4, 7, 8]. В центральной части трёхслойной структуры наблюдается высокая дискретность энергетических уровней, что практически недостижимо в «широких» квантовых ямах с «высокими» барьерами, и большая плотность энергетических уровней носителей, чего нельзя достичь в «узких» ямах даже с «высокими» барьерами. Кроме этого, сами энергетические уровни распределены по КРС неравномерно. В центральной, узкой части КРС, на частицы действует ограничивающий потенциал V_1 на границе раздела слоёв GaAs и Al_{x1}Ga_{1-x1}As. Вследствие узости слоя энергетические уровни носителей расположены довольно далеко друг от друга по оси энергии. Относительная узость центрального, активного слоя трёхслойной КРС, обеспечивает высокую дискретность энергетических уровней. В ограничивающих слоях между материалами Al_{x1}Ga_{1-x1}As и Al_{x2}Ga_{1-x2}As в области энергий, больших V_1 , действует ограничивающий потенциал $V_1 + V_2$, но между слоями GaAs и Al_{x1}Ga_{1-x1}As в этом

же промежутке энергий ограничивающий потенциал V_l уже не действует, поскольку и для GaAs и для $Al_{x_1}Ga_{1-x_1}As$ данный промежуток энергии относится к зоне проводимости. Таким образом, для частиц с энергией, большей V_l , формируется «широкая» квантовая яма, состоящая из трёх слоёв: $Al_{x_1}Ga_{1-x_1}As/GaAs/Al_{x_1}Ga_{1-x_1}As$.

Для такой квантовой ямы распределение энергетических состояний начинается со значений энергии больших, но не равных, V_l , и поскольку яма, образованная тремя слоями разнородных полупроводниковых материалов, заведомо шире квантовой ямы, возникающей в центральной части КРС, то распределение энергетических уровней в ней такое же, как и в любой другой «широкой» квантовой яме: большинство энергетических уровней частиц расположены в нижней части ямы, энергетическое расстояние между которыми постепенно возрастает по мере возрастания энергии уровней.

Подобное дискретное расположение энергетических уровней по энергетической диаграмме КРС будет наблюдаться лишь в тех структурах, в которых общая ширина широкой части КРС для промежутка энергии большего V_l остаётся в пределах длины волны де Бройля электронов в GaAs. В случае превышения этого параметра на этапе производства КРС энергетические уровни частиц в этой области будут образовывать мини-зоны энергий, а в случае значительного (более, чем в 15 – 20 раз) превышения суммарной толщины КРС над длиной волны де Бройля электронов в GaAs мини-зоны энергий частиц образуют континуум, и квантовое ограничение сохранится только для частиц, энергетические уровни которых по своему абсолютному значению находятся ниже V_l .

Волновые функции и плотности распределения вероятностей нахождения частиц на энергетических уровнях, показанных на рис. 1, рассчитанные для стационарного состояния, приведены на рис. 2 а, и 2 б, соответственно.

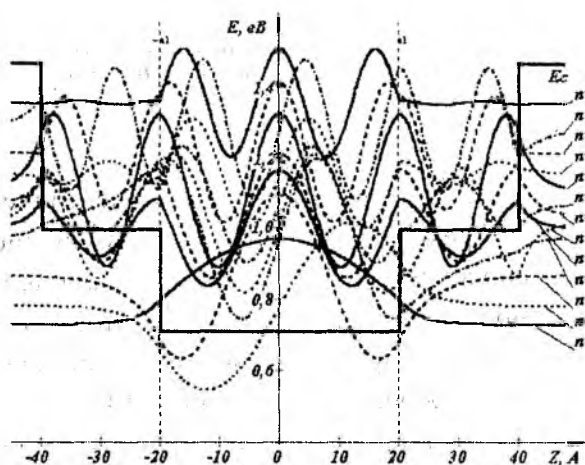


Рис. 2 а

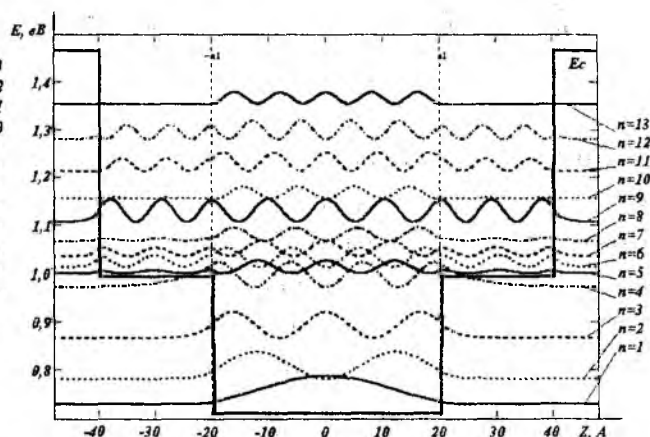


Рис. 2 б

Как показано на рисунках, частицы в стационарном состоянии наиболее сильно локализируются в центральной части КРС, даже для состояний с энергией больше V_l . Уменьшение амплитуды волновых функций частиц в слоях $Al_{x_1}Ga_{1-x_1}As$ связано с увеличением эффективной массы частиц, вызванной наличием алюминия в твёрдом растворе замещения материала слоя и, как следствие, с уменьшением подвижности носителей в этих слоях. В остальном распределение энергетических уровней, волновых функций частиц и плотности распределения вероятности нахождения частиц на энергетических уровнях сходны с аналогичными распределениями в симметричных однослойных КРС [9 – 10].

Влияние стационарного электрического поля на энергетические состояния и волновые функции частиц в трёхслойной симметричной КРС также имеет ряд особенностей по сравнению с однослойными структурами. На рис. 3 а показаны собственные значения энергии электронов на фоне энергетического профиля зоны проводимости КРС, изменившейся под

действием внешнего стационарного электрического поля. Расчёты собственных значений энергии проводились с помощью второго приближения теории возмущений без учёта влияния экранирования энергетических состояний электронов полем объёмного заряда. На рис. 3 б показано изменение положения энергетических уровней электронов в сравнении со стационарным состоянием для первых семи уровней.

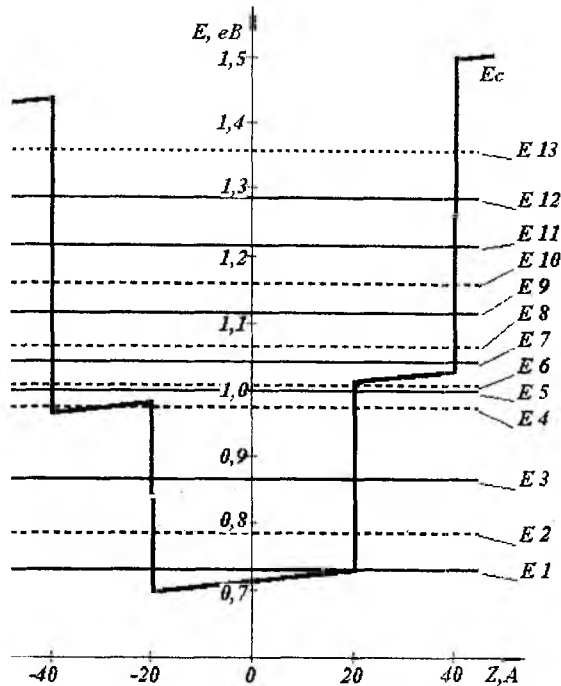


Рис. 3 а

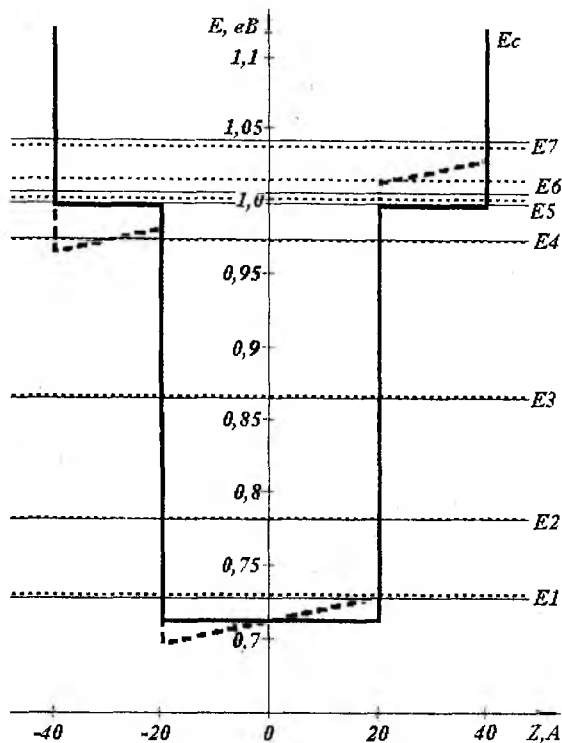


Рис. 3 б

По сравнению с однослойной КРС при одинаковой напряжённости внешнего электрического поля, действующего как на однослойную, так и на трёхслойную структуру, изменение положения энергетических уровней электронов выражено значительно слабее, даже для первых двух – трёх уровней. Однако влияние внешнего поля на вышележащие уровни хотя и слабо, но более ощутимо, чем в однослойной КРС. Подобный характер изменения собственных значений энергии электронов может быть объяснён двумя основными причинами:

- на уровни, лежащие ниже потенциального барьера V_1 , стабилизирующее влияние оказывают уровни, лежащие между потенциалами V_2 и V_1 , поскольку они расположены на энергетической диаграмме близко к границе раздела барьеров V_2 и V_1 , и их взаимосвязь и влияние на состояния, лежащие ниже V_1 , достаточно существенно;
- суммарный потенциальный барьер $V_1 + V_2$ всей структуры оказывает, с учётом толщины слоёв $Al_{x_1}Ga_{1-x_1}As$ и координатной зависимости напряженности внешнего стационарного электрического поля, более сильное экранирующее воздействие на энергетические состояния электронов, чем барьер той же высоты, но в однослойной структуре.

Расчёты волновых функций электронов и распределений плотности вероятности электронов на энергетических уровнях для трёхслойной КРС, находящейся под действием внешнего стационарного электрического поля, проводились как в первом, так и во втором приближении теории возмущений. Волновые функции и распределения плотности вероятности нахождения электронов на энергетических уровнях, рассчитанные в первом приближе-

нии теории возмущений, показаны на рис. 4 а, рис. 4 б соответственно, и рассчитанные во втором приближении теории возмущений – на рис. 5 а и рис. 5 б соответственно.

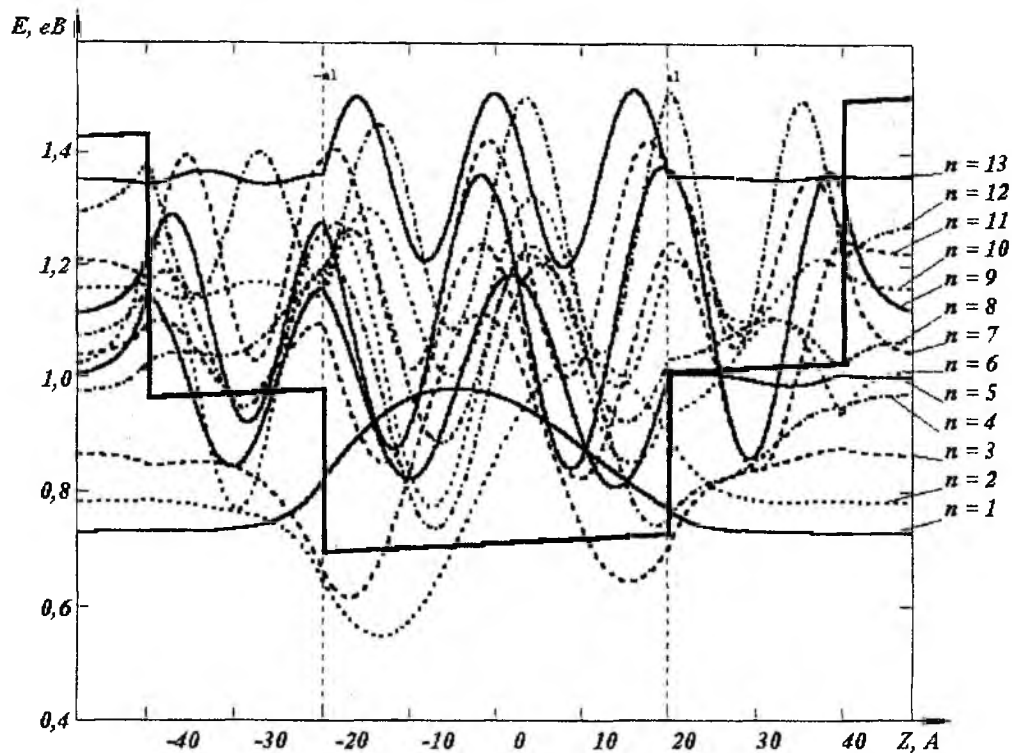


Рис. 4 а

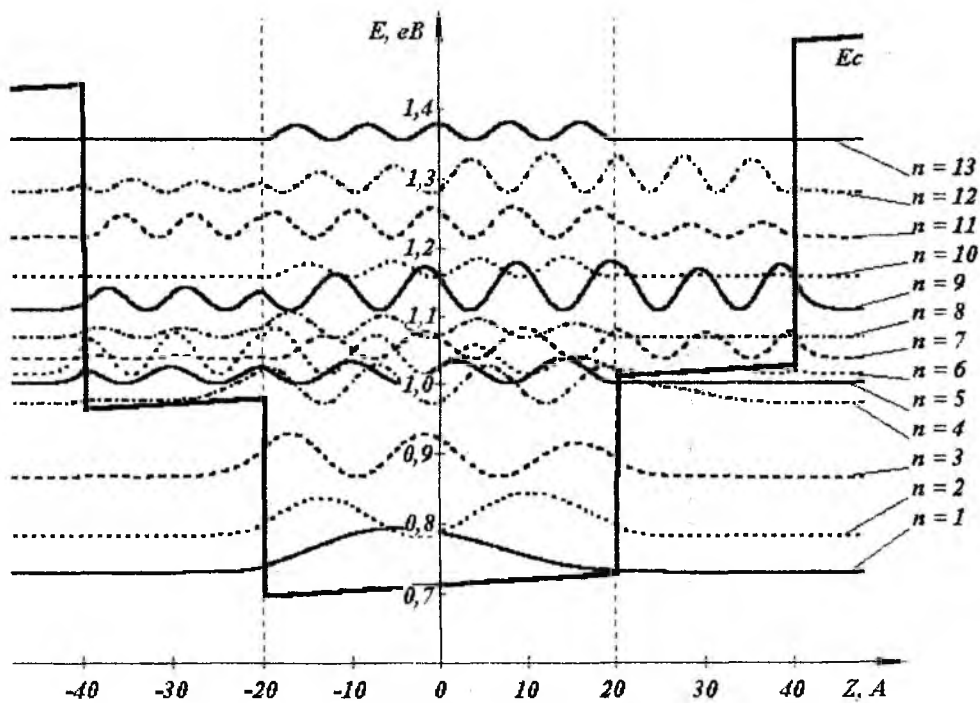


Рис. 4 б

Результаты расчётов иллюстрируют ещё одно отличие трёхслойных КРС (по сравнению с однослойными) – даже под действием внешнего поля носители пространственно локали-

зуются в центральном слое КРС, и их перераспределение по самому слою под действием поля незначительно в отличие от однослойной КРС,

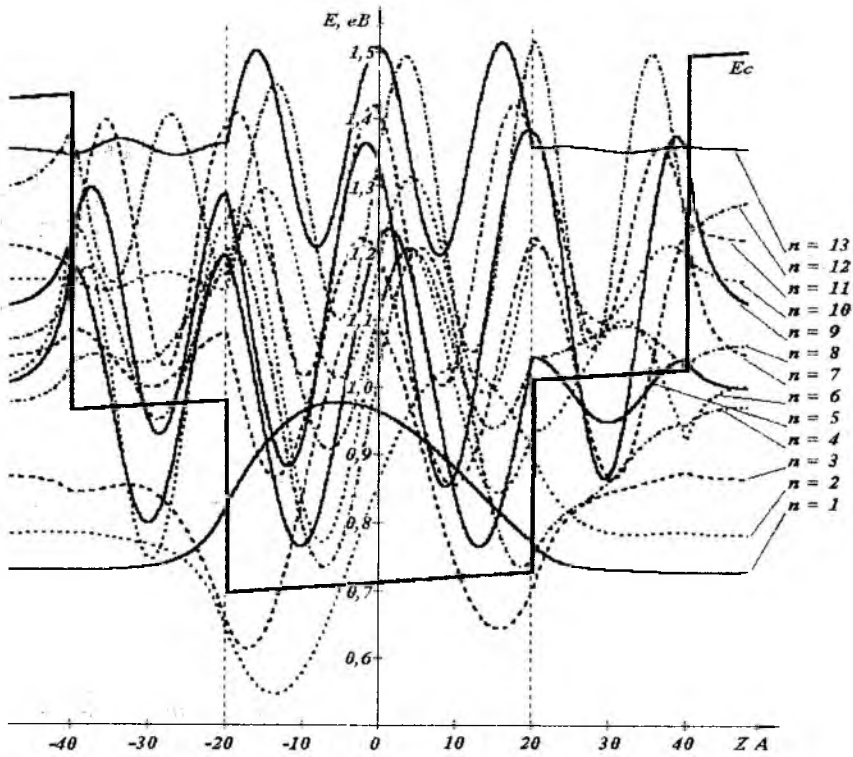


Рис. 5 а

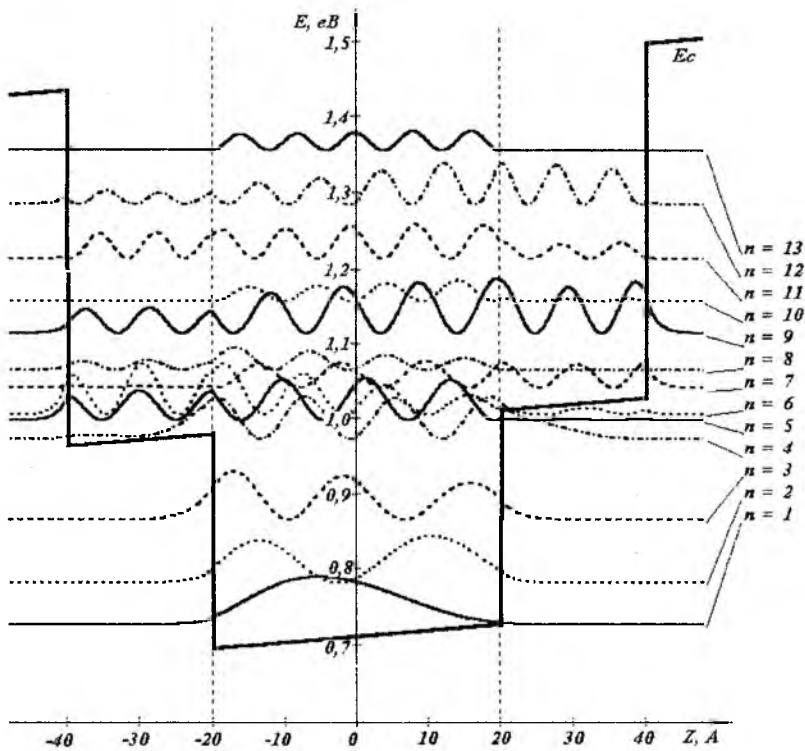


Рис. 5 б

где носители сильно смещаются в пределах слоя под действием внешнего стационарного электрического поля, векторы напряженности которого перпендикулярны плоскостям квантового ограничения: электроны движутся против вектора напряженности внешнего поля,

дырки – в одном направлении с ним. Иными словами, в трёхслойной КРС внешнее поле способствует инжекции носителей в область квантового ограничения, почти не меняя их энергетического спектра и распределения по уровням. Следовательно, уже на этапе производства нанозлектронного прибора с такой КРС можно более точно прогнозировать его электрооптические свойства. Данная особенность трёхслойных КРС является важной с точки зрения практического применения КРС в светоизлучающих приборах и особенно в полупроводниковых лазерах. Большинство носителей будет сконцентрировано в центральной, рабочей, области прибора, что в конечном итоге приведёт к уменьшению порогового тока в случае лазерной генерации. Увеличение концентрации носителей приведёт также к возрастанию диэлектрической проницаемости активного слоя, а значит – к возрастанию его коэффициента преломления и формированию полупроводникового волновода, по которому и будет распространяться генерируемое излучение.

Однако наличие дополнительных ограничивающих слоёв с некоторым содержанием алюминия, в которых так же как и в активном слое наблюдается квантоворазмерный эффект, при определённой конфигурации геометрических и энергетических параметров трёхслойной КРС может привести к возрастанию коэффициента преломления не только в активном слое, но и в ограничивающих слоях до значений, сравнимых с коэффициентом преломления активного слоя. При этом возможно появление таких паразитных эффектов, как пространственная расходимость поля излучения основных мод, появление паразитных продольных и поперечных мод, что в свою очередь приводит к снижению выходной оптической мощности.

Список литературы: 1. Пащенко А.Г., Ванцан В.М. Формирование энергетического спектра многослойной симметричной квантоворазмерной структуры на основе GaAs/Al_{x1}Ga_{1-x1}As/Al_{x2}Ga_{1-x2}As. Часть 1. Постановка задачи // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2002. Вып. 125. С. 85 – 92. 2. А. Г. Pashchenko and V.M Vantsan A Study of Wannier-Mott Exciton Stationary Energy States in Semiconductor Injection Lasers Based on Size-Quantized Structures // Telecommunications and Radio Engineering N 52 (2), 1998 P 53 – 56. 3. Пащенко А.Г. Энергетические состояния частиц и квазичастиц в активной области ИПЛ на КРС на основе In-GaAs/InP // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 1999. Вып. 111. С. 26 – 29. 4. А. Г. Pashchenko Variations in the particles and quasiparticles energy states in semiconductive nanostructures under the external electric field action // Праці першої міжнародної наукової конференції молодих вчених з прикладної фізики. Київський нац. ун-т ім. Тараса Шевченка. Радіофізичний факультет. 2001. С. 100. 5. Пащенко А.Г. Влияние энергетических и геометрических параметров квантово-ограниченных слоёв на энергетические состояния частиц и квазичастиц // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2001. Вып. 122. С. 162 – 168. 6. Пащенко А.Г. Влияние внешнего стационарного электрического поля на энергетические состояния частиц и квазичастиц в несимметричной квантоворазмерной структуре // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2001. Вып. 121. С. 134 — 138. 7. Пащенко А.Г. Влияние внешнего стационарного электрического поля на энергетические состояния частиц и квазичастиц в квантоворазмерной структуре. Часть 1. Постановка задачи // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2001. Вып. 117. С. 117 – 120. 8. Пащенко А.Г. Влияние внешнего стационарного электрического поля на энергетические состояния частиц и квазичастиц в квантоворазмерной структуре. Часть 2. Обсуждение результатов // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2001. Вып. 118. С. 55 — 60. 9. Херман М. Полупроводниковые сверхрешетки: Пер с англ. М.: Мир 1989. 240 с. 10. Бузанёва Е.В. Микроструктуры интегральной электроники. М.: Радио и связь, 1990. 304 с.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 19.06.2002