

ФЛЕШ-ПАМЯТЬ НА ОСНОВЕ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК**Введение**

В современной микроэлектронике большое внимание уделяется исследованию объектов пониженной размерности, так как переход к приборам на наноструктурах перспективен с точки зрения увеличения быстродействия обработки информации, уменьшения затрат энергии в пересчете на одну логическую операцию, увеличения плотности хранимой информации, улучшения стабильности работы [1].

Физические свойства квантовых точек (малоразмерных кристаллов) могут принципиально отличаться от кристаллов большой размерности, например, вещество с металлическими свойствами только за счет уменьшения размеров может перейти в диэлектрическое состояние.

В квантовых точках носители заряда заключены в ограниченном (малом) объеме пространства и число независимых состояний носителей в квантовой точке ограничено. Поскольку энергетический спектр квантовых точек является уже целиком дискретным, то их иногда называют "искусственными атомами". Энергетический спектр зависит от размеров квантовой точки. Как и в атомах, некоторые энергетические уровни могут совпадать, т.е. будут "вырожденными" [2].

Квантовая точка является потенциальной ямой для носителей заряда, что и обуславливает возможность накопления их в качестве метода сохранения информации.

При трехмерном ограничении движения частиц принцип сохранения информации в такой системе сводится к задаче о нахождении разрешенных состояний в ноль-мерной (0D) системе [3].

Эти и другие уникальные свойства и позволяют использовать квантовые точки в качестве ячеек для накопления бит информации.

Основной принцип работы флеш-памяти на основе квантовых точек идентичен принципу памяти на транзисторе с «плавающим затвором», только для хранения информации вместо подзатворной области для хранения бита информации используется потенциальная яма квантовой точки. Размер квантовых точек, которые можно использовать для создания элементов памяти, имеет порядок 10 нм и даже меньше, что позволяет достичь высокого значения плотности записи информации.

Одно из преимуществ флеш-памяти на квантовых точках, по сравнению с традиционной, основанной на «плавающем затворе», заключается в отсутствии продольной проводимости (вдоль затвора), малой емкостной связи между соседними элементами памяти. Потеря заряда в одном кластере (из массива кластеров) не ведет к полной потере информации ячейки памяти, в то же время при утечке заряда из «плавающего затвора» вся информация теряется [4].

Также, в перспективе, память на основе квантовых точек будет иметь больший срок хранения информации и на порядок большую скорость записи/считывания.

Однако основным преимуществом технологии флеш-памяти на основе квантовых точек является ее технологическая и схемотехническая близость к классической полупроводниковой электронике, что выгодно отличает ее на фоне других перспективных направлений в развитии электроники и позволит уже в ближайшем будущем использовать флеш-память на основе квантовых точек повсеместно.

Применение квантовой точки в качестве структурного элемента ячейки флеш-памяти призвано устранить один из основных недостатков структур ЭППЗУ с плавающим затвором, проявляющийся в невозможности их дальнейшего масштабирования от гига- до терабитного

масштаба. Эта перспективная технология не требует разработки новой схемотехнической базы и полностью совместима с распространенными архитектурами флеш-памяти [5].

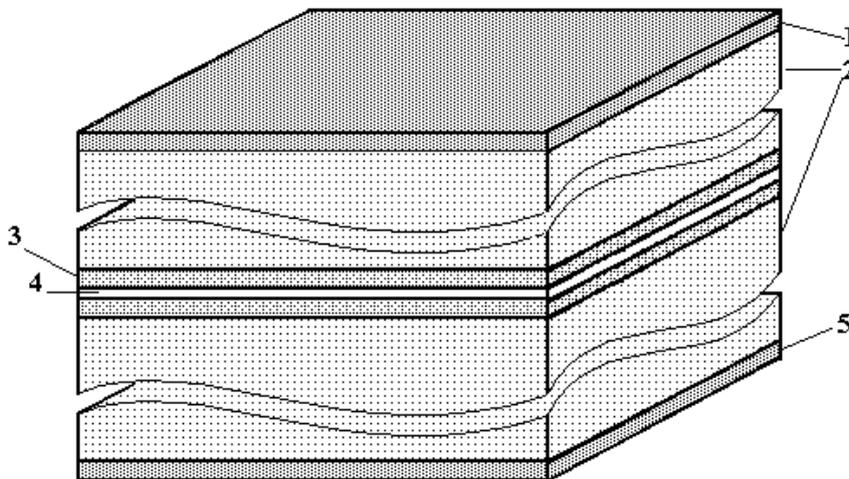
Структура ячейки памяти

В данной работе рассматривается многослойная несимметричная квантоворазмерная структура, созданная на основе $\text{GaAs}/\text{Al}_{x_1}\text{Ga}_{1-x_1}\text{As}/\text{Al}_{x_2}\text{Ga}_{1-x_2}\text{As}$. Исследованы особенности локализации волновых функций носителей в такой структуре и ее зависимость от величины напряженности внешнего электрического поля, с учетом изменения ширины областей квантовых ям и барьера, а также его энергетической высоты (глубины квантовых ям).

На рис. 1 показана структура полупроводникового кристалла, содержащего КРС на основе $\text{GaAs}/\text{Al}_{x_1}\text{Ga}_{1-x_1}\text{As}/\text{Al}_{x_2}\text{Ga}_{1-x_2}\text{As}$.

На рис. 2 показана энергетическая диаграмма исследуемой несимметричной многослойной КРС. Необходимо отметить в качестве одного из основных допущений при исследовании энергетического спектра носителей в данной структуре изотропность эффективных масс носителей и неизменность их в пределах каждого слоя [1, 2, 4].

В рассматриваемой структуре слой материала $\text{Al}_{x_1}\text{Ga}_{1-x_1}\text{As}$ с широкой запрещенной зоной толщиной не более длины волны де Бройля электронов в GaAs разделяет две квантовоограниченные области (квантовые ямы) различной ширины и глубины. Содержание алюминия – x_1 в твердых растворах замещения ограничивающих материалов различно, что определяет различную глубину ям. Толщина слоев, формирующих ямы, также различается. Со стороны «катода» – яма широкая, в ней локализуются носители, формирующие двумерный электронный газ. Справа от блокирующего барьера – со стороны «анода» яма узкая и представляет собой собственно квантовую точку. Таким образом, элемент памяти формируется изменением химического состава слоев и их толщины.



- 1, 5 – металлизация контактных площадок разводки и общего электрода подложки;
- 2 – слои подложки и ограничивающие (буферные) слои $\text{Al}_{x_2}\text{Ga}_{1-x_2}\text{As}$;
- 3 – квантово-размерные ограничивающие (барьерные) слои $\text{Al}_{x_1}\text{Ga}_{1-x_1}\text{As}$;
- 4 – квантово-ограниченный слой GaAs

Рис. 1

Эффективные массы частиц и квазичастиц в каждом материале и их зависимость от молярных долей компонентов твердых растворов, составляющих тот или иной материал, а также ширина запрещенной зоны материала и ее зависимость от химического состава конкретного соединения определяются в приближении Латтингера и Кона [11] по соотношениям, представленным в таблице:

Материал	GaAs	AlAs	$Al_xGa_{1-x}As$
Параметр			
$E_g, \text{эВ}$	1,424	3,018	$1,424+1,247 \cdot x, 0 < x < 0,45$ $1,424+1,247 \cdot x+1,427 \cdot (x-0,45), 0,45 < x < 1,0$
m_e^*/m_0	0,067	0,124	$0,067+0,057 \cdot x$
γ_1	6,85	3,45	$6,85-3,4 \cdot x$
γ_2	2,1	0,68	$2,1-1,42 \cdot x$

В таблице m_e^* – эффективная масса электрона; m_0 – масса свободного электрона; γ_1 и γ_2 – постоянные Латтингера. Согласно [11] эффективные массы тяжелой и легкой дырок могут быть вычислены по формулам:

$$m_{hh}^* = \frac{m_0}{(\gamma_1 - 2 \cdot \gamma_2)}, \quad (1)$$

$$m_{lh}^* = \frac{m_0}{(\gamma_1 + 2 \cdot \gamma_2)}, \quad (2)$$

где m_{hh}^* и m_{lh}^* – эффективные массы тяжелой и легкой дырок соответственно.

Высоты барьеров для электронов в зоне проводимости и для легких и для тяжелых дырок в валентной зоне определяются из полуэмпирического правила Миллера [15]. Согласно этому правилу (для соединений $A^{III}B^V$, $A^{II}B^{VI}$ и их твердых растворов с элементами III и II групп) высота потенциального барьера для электронов в зоне проводимости и для дырок в валентной зоне на гетерогранице между узкозонным и широкозонным материалами относятся как 65% и 35% от общей разности между шириной запрещенной зоны широкозонного и узкозонного материалов. На рис. 2 показана энергетическая диаграмма ячейки памяти, общая структура которой изображена на рис. 1.



Рис. 2

На рис. 2 энергия электронов отсчитывается от дна зоны проводимости вверх, а энергия дырок – от потолка валентной зоны вниз наиболее узкозонного материала так, как это принято в физике полупроводников. Ширина каждого квантово-ограниченного слоя – квантовых ям и барьеров (не более длины волны де-Бройля для ограничиваемого материала, в данном случае для GaAs эта величина составляет приблизительно 140 Å).

Таким образом, на рис. 2 для областей I, III и V (нумерация областей – слева направо):

$$Ve_1 = 0,65 \cdot (E_g Al_{x1}Ga_{1-x1}As - E_g GaAs), \quad (3)$$

$$V_h 1 = 0,35 \cdot (E_g \text{Al}_{x_1}\text{Ga}_{1-x_1}\text{As} - E_g \text{GaAs}), \quad (4)$$

а для областей II и IV:

$$V_e 2 = 0,65 \cdot (E_g \text{Al}_{x_2}\text{Ga}_{1-x_2}\text{As} - E_g \text{Al}_{x_1}\text{Ga}_{1-x_1}\text{As}), \quad (5)$$

$$V_h 2 = 0,35 \cdot (E_g \text{Al}_{x_2}\text{Ga}_{1-x_2}\text{As} - E_g \text{Al}_{x_1}\text{Ga}_{1-x_1}\text{As}), \quad (6)$$

где $V_e 1, V_e 2$ – высоты потенциальных барьеров для электронов в зоне проводимости на соответствующих гетерограницах, эВ; $V_h 1, V_h 2$ – высоты потенциальных барьеров для дырок в валентной зоне, эВ; x_1, x_2 – молярные доли алюминия в соответствующих слоях арсенида галлия; E_g – ширина запрещенной зоны материала, эВ.

Определение волновых функций носителей в многослойной структуре

Для определения собственных значений энергии электронов, легких и тяжелых дырок в квантово-размерной структуре, энергетический профиль которой показан на рис. 2, необходимо решить стационарное уравнение Шредингера, которое для каждой из областей записывается так:

$$-\frac{\hbar^2}{2m_1} \cdot \frac{\partial^2 \Psi_1}{\partial z^2} + V_1 \cdot \Psi_1 = E \cdot \Psi_1, \quad (7)$$

$$-\frac{\hbar^2}{2m_2} \cdot \frac{\partial^2 \Psi_2}{\partial z^2} = E \cdot \Psi_2, \quad (8)$$

$$-\frac{\hbar^2}{2m_1} \cdot \frac{\partial^2 \Psi_3}{\partial z^2} + V_1 \cdot \Psi_3 = E \cdot \Psi_3, \quad (9)$$

$$-\frac{\hbar^2}{2m_3} \cdot \frac{\partial^2 \Psi_4}{\partial z^2} + (V_1 + V_2) \cdot \Psi_4 = E \cdot \Psi_4, \quad (10)$$

$$-\frac{\hbar^2}{2m_1} \cdot \frac{\partial^2 \Psi_5}{\partial z^2} = E \cdot \Psi_5. \quad (11)$$

В уравнениях (7) – (11) нумерация волновых функций Ψ (1 – 5) соответствует нумерации областей (I – V) на рис. 2.

Введем обозначения:

$$\frac{2m_1}{\hbar^2} \cdot (V_1 - E) = k_1^2, \quad (12)$$

$$\frac{2m_2}{\hbar^2} \cdot E = k_2^2, \quad (13)$$

$$\frac{2m_3}{\hbar^2} \cdot (V_1 + V_2 - E) = k_3^2, \quad (14)$$

$$\frac{2m_1}{\hbar^2} \cdot E = k_4^2. \quad (15)$$

С учетом обозначений (12) – (15) систему уравнений (7) – (11) можно переписать так:

$$\frac{\partial^2 \Psi_1}{\partial z^2} - k_1^2 \cdot \Psi_1 = 0, \quad (16)$$

$$\frac{\partial^2 \Psi_2}{\partial z^2} + k_2^2 \cdot \Psi_2 = 0, \quad (17)$$

$$\frac{\partial^2 \Psi_3}{\partial z^2} - k_1^2 \cdot \Psi_3 = 0, \quad (18)$$

$$\frac{\partial^2 \Psi_4}{\partial z^2} - k_3^2 \cdot \Psi_4 = 0, \quad (19)$$

$$\frac{\partial^2 \Psi_5}{\partial z^2} + k_4^2 \cdot \Psi_5 = 0, \quad (20)$$

Решения уравнений (16) – (20) могут быть записаны в виде [1, 9, 10]:

$$\Psi_1 = A_1 \cdot \exp(i \cdot k_1 z) + B_1 \cdot \exp(-i \cdot k_1 z), \quad (21)$$

$$\Psi_2 = A_2 \cdot \exp(i \cdot k_2 z) + B_2 \cdot \exp(-i \cdot k_2 z), \quad (22)$$

$$\Psi_3 = A_3 \cdot \exp(i \cdot k_1 \cdot (z - a)) + B_3 \cdot \exp(-i \cdot k_1 \cdot (z - a)), \quad (23)$$

$$\Psi_4 = A_4 \cdot \exp(i \cdot k_3 \cdot (z - a - b)) + B_4 \cdot \exp(-i \cdot k_3 \cdot (z - a - b)), \quad (24)$$

$$\Psi_5 = A_5 \cdot \exp(i \cdot k_4 \cdot (z - a - b - c)) + B_5 \cdot \exp(-i \cdot k_4 \cdot (z - a - b - c)). \quad (25)$$

В выражениях (21) – (25) a, b, c – ширина первой квантовой ямы, блокирующего барьера и второй квантовой ямы соответственно.

Исследование локализации волновых функций носителей в области квантово-ограниченной области элемента памяти на квантовых точках в цикле записи – считывания

В данной работе распределение волновых функций в квантовой точке в цикле перезаписи флеш-памяти изучалось с использованием математического пакета MathCAD. Моделирование было проведено для случая двухслойной несимметричной квантово-размерной структуры на основе GaAs/Al_xGa_{1-x}As.

Зонная диаграмма структуры GaAs/Al_xGa_{1-x}As, используемой в модели, приведена на рис. 3, где $E_c(z)$ – граница зоны проводимости, $E_v(z)$ – граница валентной зоны.

На рис. 4 показана волновая функция электронов в зоне проводимости квантовой точки. На рисунке $P_c(z)$ – потенциал зоны проводимости, $\text{Re}(\Psi_c(z, x_c))$ – реальная часть волновой функции, $\text{Im}(\Psi_c(z, x_c))$ – мнимая часть волновой функции, $|\Psi_c(z, x_c)|$ – модуль волновой функции (огibaющая), x_c – текущее значение энергии частицы.

На рис. 5 показана волновая функция тяжелых дырок в валентной зоне квантовой точки. На нем $P_v(z)$ – потенциал зоны проводимости, $\text{Re}(\Psi_c(z, x_h))$ – реальная часть волновой функции, $\text{Im}(\Psi_c(z, x_h))$ – мнимая часть волновой функции, $|\Psi_c(z, x_h)|$ – модуль волновой функции, x_h – текущее значение энергии частицы.

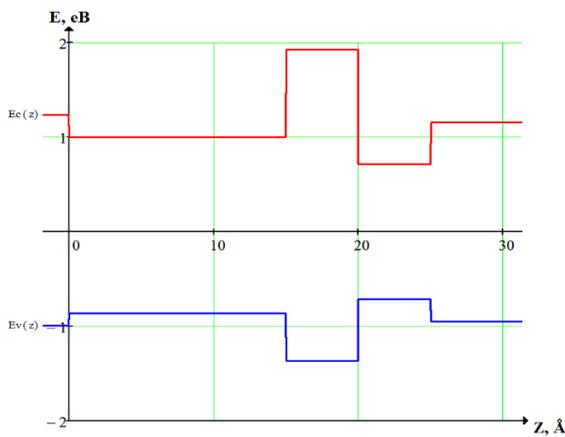


Рис. 3

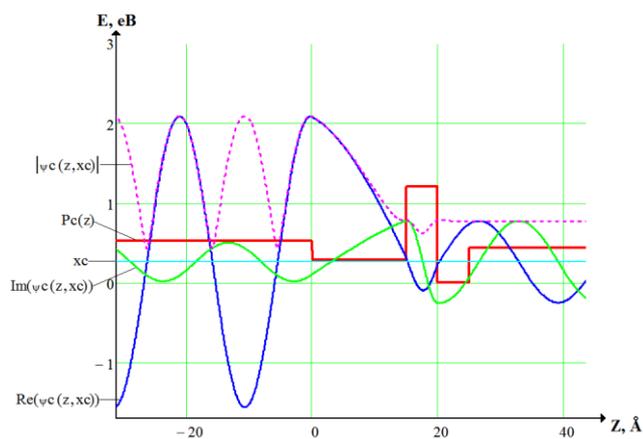


Рис. 4

Общая картина волновых функций частиц (электронов и дырок) на фоне энергетической диаграммы двухслойной квантово-размерной структуры показана на рис. 6, где $E_c(z)$ – граница зоны проводимости, $E_v(z)$ – граница валентной зоны.

На рис. 7 показана диаграмма изменения коэффициента отражения (RDC) и коэффициента прозрачности (DRc) структуры в зависимости от энергии падающей частицы.

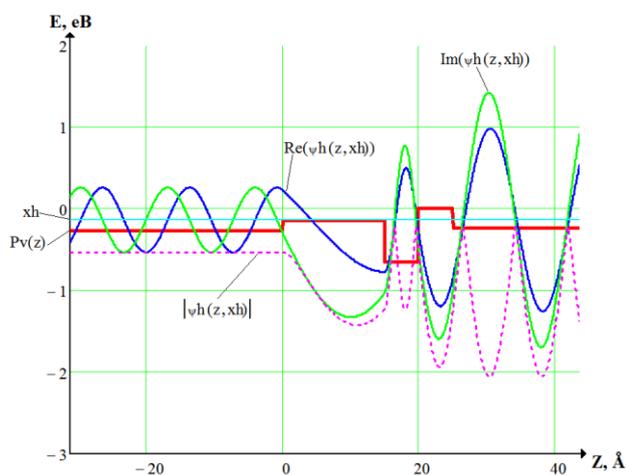


Рис. 5

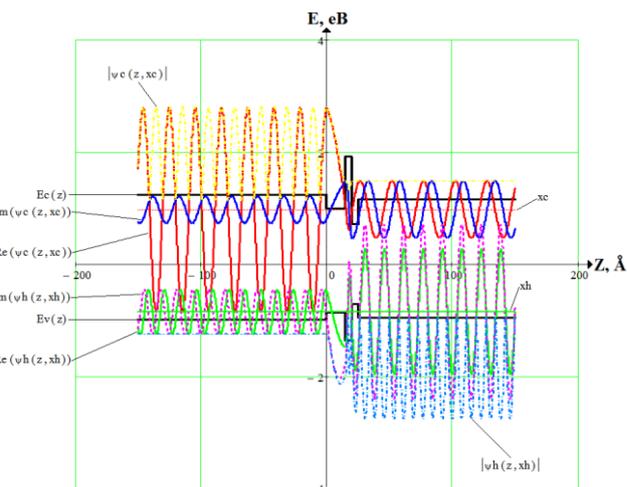


Рис. 6

Реальная часть волновой функции ($\text{Re}(\Psi_c(z, xc))$, $\text{Re}(\Psi_h(z, xh))$) соответствует активному сопротивлению структуры.

Мнимая часть волновой функции ($\text{Im}(\Psi_c(z, xc))$, $\text{Im}(\Psi_h(z, xh))$) соответствует потерям, которые связаны с переотражением волновой функции на границах областей в результате туннелирования частиц, и визуализирует накопление заряда в том или ином слое структуры; по ней можно отслеживать запись и чтение информации в структуре.

Квадрат модуля волновой функции частицы – плотность распределения вероятности нахождения частицы в данном слое и определяет локализацию волновых функций при каждом значении внешнего поля.

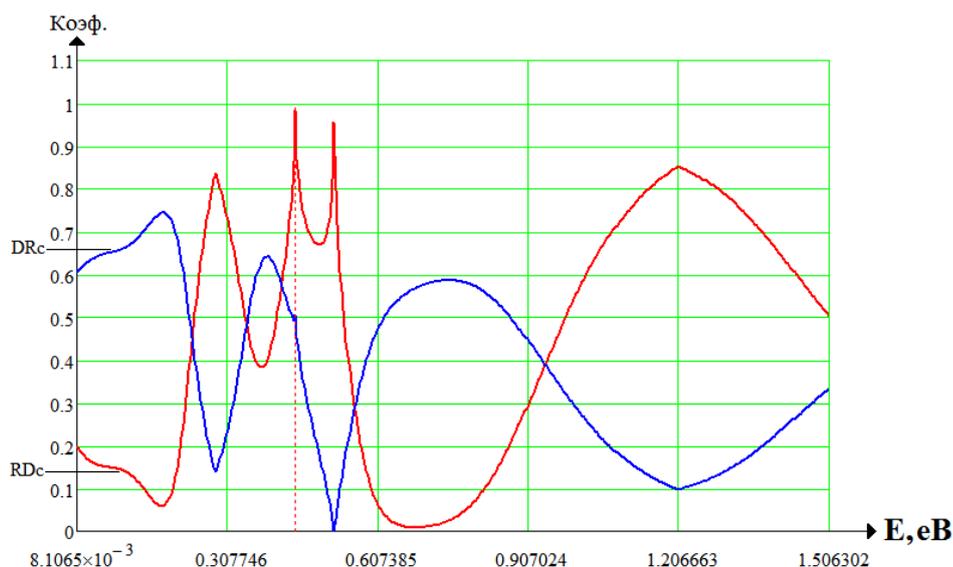


Рис. 7

Заключение

Из всех современных альтернативных направлений по улучшению характеристик энергонезависимой памяти самой перспективной является технология использования в качестве структурного элемента хранения информации ячейки памяти на основе квантовой точки, так как она, при обеспечении значительного улучшения характеристик (повышение быстродействия, времени хранения информации, увеличение степени интеграции), помимо этого, наиболее производственно близка к ныне используемой традиционной полупроводниковой технологии, что значительно облегчает переход к массовому использованию этой технологии. Также использование квантовых точек в качестве структурной основы для ячеек флеш-памяти не требует разработки новой схемотехнической базы и полностью совместимо с распространенными архитектурами флеш-памяти. Полученная математическая модель по изменениям волновой функции позволяет отслеживать циклы записи/чтения в рассчитанном примере структуры элемента памяти на основе КТ GaAs/Al_xGa_{1-x}As и наглядно демонстрирует возможность использования квантовой точки в качестве основы для создания ячейки флеш-памяти нового поколения.

В работе рассмотрена квантовая точка на основе полупроводниковой квантово-размерной структуры GaAs/Al_xGa_{1-x}As, состоящая из двух квантовых ям различной глубины, разделенных высоким тонким проницаемым барьером.

Цикл перезаписи в ячейке памяти на основе квантовой точки осуществляется изменением внешнего напряжения, так же, как и в традиционной флеш-памяти. Поэтому, для исследования перераспределения заряда в квантовой точке в процессе перезаписи проведено квантово-механическое моделирование изменения волновых функций электронов и дырок при изменении внешнего напряжения пропорционально высоте разделительного барьера.

В результате моделирования установлено, что по мере увеличения энергии частицы по обе стороны барьера возникают состояния, способствующие поочередному накоплению и рассасыванию зарядов в каждой из квантовых ям. Следовательно, эти состояния могут быть использованы для записи, хранения и считывания информации, т.е. во всем цикле запоминания.

При моделировании были приняты ряд допущений, важнейшим из которых является отсутствие учета влияния внешнего поля на энергетическую диаграмму квантовой точки. Подобное допущение на предварительном этапе исследования является допустимым, поскольку амплитуда внешнего напряжения в процессе перезаписи не превышает 3 – 5 В,

и падение напряжения на квантовой точке с учетом падения напряжения на контактных и буферных областях невелико. Кроме того, при моделировании не учитывалось поле объемного заряда поскольку квантовая точка обычно располагается в слое полупроводника с однородным униполярным распределением примеси, и, таким образом это поле также не оказывает существенного влияния на процесс перераспределения носителей в квантовой точке.

Предложенная модель позволяет оценить возможность использования в качестве ячейки памяти квантовой точки как с рассмотренной, так и более сложной энергетической диаграммой. В качестве изменяемых параметров модели могут выступать: химический состав и содержание компонентов отдельных слоев квантовых ям и барьеров, их ширина и количество.

Список литературы: 1. *Future Trends in Microelectronics.* / Luryi S. J. Xu, Zaslavsky A. John Wiley&Sons, Inc., 1999. p.135. 2. Перспективные материалы / Астахов М.В., Белый А.В., Капуткина Н.Е. – Витебск : УО "ВГТУ Витебск", 2009. – 76 с. 3. *Физика* квантовых низкоразмерных структур / Демиховский В.Я., Вугальтер Г.А. – М. : Логос, 2000. – 57 с. 4. *Capacitor on Metal Via stacked Plug (CMPV) memory cell for 0.25 mm CMOS embedded FeRAM*, Kazushi Amanuma et al, Proc IEDM-98, pp. 363–366. 5. *An Advanced Flash Memory Technology on SOI*, David Burnett et al, Proc IEDM-98, pp. 983–986. 6. *Физика* полупроводниковых лазеров ; пер. с япон. ; под ред. Х. Такумы. – М. : Мир, 1989. – 310с. 7. *Херман М.* Полупроводниковые сверхрешетки ; пер с англ. – М. : Мир, 1989. – 240 с. 8. *Бузанева Е.В.* Микроструктуры интегральной электроники. – М. : Радио и связь, 1990. – 304 с. 9. *Т. Андо и др.* Электронные свойства двумерных систем ; пер. с англ. – М. : Мир, 1985. – 416 с. 10. *Л. Эсаки* Молекулярно-лучевая эпитаксия и гетероструктуры ; пер с англ. ; под ред. Л.Ченга, К. Плога. – М. : Мир, 1989. – 584 с. 11. *Полупроводниковые* инжекционные лазеры. Динамика, модуляция, спектры ; пер. с англ. ; под ред У. Тсанга. – М. : Радио и связь, 1990. – 320 с. 12. *Гауэр Дж.* Оптические системы связи ; пер. с англ.- М. : Радио и связь, 1989. – 504 с. 13. *Справочник* по лазерной технике ; пер. с нем. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 504 с. 14. *Ансельм А.И.* Введение в теорию полупроводников. – М. : Наука, 1978. – 615 с. 15. *Ч. Куммель* Квантовая теория твердых тел ; пер. с англ. – М. : Наука, 1967. – 491 с. 16. *J.M. Luttinger, W. Kohn.* Motion of Electrons and Holes in Perturbed Periodic Fields // Phys. Rev. Ser. B. – 1955. – Vol. 97, No 4. – P. 869 – 883.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 11.04.2016