

УДК 621.382.001.63

## ЭЛЕМЕНТ ЭНЕРГОНЕЗАВИСИМОЙ ПАМЯТИ НА ОСНОВЕ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК

**К.Г. Слабый, А.Г. Пашенко**

*Харьковский национальный университет радиоэлектроники, пр. Науки 14, Харьков 61166,  
e-mail: Constantine-1992@yandex.ua*

Поступила в редакцию 10 марта 2017 г.

В работе предложен перспективный элемент флэш-памяти, использующий в качестве ячейки хранения информации массив самоорганизованных квантовых точек, применяемых как промежуточный слой в структуре полевого транзистора с модулированным легированием. Описаны физические основы хранения информации в предлагаемом элементе памяти. Представлена схематическая структура изучаемого элемента на основе структуры GaAs/AlGaAs MODFET транзистора, а также его функционирование в режиме записи, чтения, стирания и хранения информации. Структуру слоя квантовых точек предлагается выращивать на основе принципа самосогласованного роста Странского-Крастанова. Цикл перезаписи в ячейке памяти на основе квантовой точки осуществляется изменением напряжения на затворе, так же, как и в традиционной флэш-памяти. **КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** квантовая точка, флэш-память, механизм Странского-Крастанова, туннелирование, полупроводниковые соединения III-V группы.

У роботі запропоновано перспективний елемент флеш-пам'яті, який застосовує в якості комірки зберігання інформації масив самоорганізованих квантових точок, використаних як проміжний шар у структурі польового транзистора з модульованим легуванням. Описано фізичні основи зберігання інформації в запропонованому елементі пам'яті. Представлена схематична структура досліджуваного елемента на основі структури GaAs / AlGaAs MODFET транзистора, а також його функціонування в режимі запису, читання, стирання і зберігання інформації. Структуру прошарку квантових точок пропонується вирощувати на основі принципу самоузгодженого зростання Странського-Крастанова. Цикл перезапису в комірці пам'яті на основі квантової точки здійснюється зміною напруги на затворі, так само, як і в традиційній флеш-пам'яті.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** квантова точка, флеш-пам'ять, механізм Странського-Крастанова, туннелювання, напівпровідникові сполуки III-V групи.

This paper proposes a perspective flash memory element which is used as a storage cell array of self-assembled quantum dots as an intermediate layer in the structure of a field effect transistor with modulated doping. Described the physical basis of information storage in the proposed memory cell. A schematic structure of the element and its operation of recording, reading and erasing of information storage studied based on GaAs / AlGaAs MODFET transistor structure. The structure of the layer of quantum dots is proposed to grow on the basis of the principle of self-consistent growth of Stransky-Krastanov. The rewriting cycle in a memory cell based on a quantum dot is performed by changing the gate voltage, as well as in traditional flash memory.

**KEY WORDS:** quantum dot, flash memory, Stranski-Krastanov growth mechanism, tunneling, binary semiconductors compounds (III-V).

### ВВЕДЕНИЕ

Текущий прогресс в области полупроводниковой памяти обусловлен существенным уменьшением масштабов функциональных размеров структурных элементов схем, таких как логические узлы и ячейки памяти. Однако, так как функциональные размеры приближаются к масштабам, в которых существенное значение имеют эффекты квантовой механики, возможность дальнейшего увеличения степени интеграции при использовании современных полупроводниковых технологий достигнет своего предела уже в ближайшие годы. Размеры структурных элементов приближаются к единицам нанометров что приводит к большому количеству туннельных токов утечки. Следовательно, должны быть найдены новые перспективные пути для дальнейшего развития технологии полупроводниковых микросхем.

Сегодняшний рынок памяти делится в основном между двумя полупроводниковыми технологиями хранения информации, динамическими оперативными запоминающими устройствами (ДОЗУ) и флэш-памятью [1], обе имеют свои преимущества и недостатки. ДОЗУ обладает высоким быстродействием, но энергозависима ввиду необходимости циклического обновления информации в ячейках памяти. Флэш-память наоборот – энергонезависима с возможностью хранения информации в течении нескольких лет, но обладает относительно низкой скоростью записи и считывания информации. Ввиду противоположности положительных и отрицательных качеств ДОЗУ и флэш-памяти существует тенденция к разработке технологии которая сочетала бы в себе как и высокое быстродействие, так и длительное время хранения информации (к примеру: FeRAM, MRAM или PCRAM [2]). Однако на данный момент из-за проблем с обеспечением приемлемой надежности и стоимости ни одна из таких технологий не пошла в массовое производство.

Одним из потенциальных кандидатов на роль технологии которая могла бы объединить преимущества быстрой скорости записи и длительного времени хранения информации является память, основанная на самоорганизованных квантовых точках (КТ) [3]. Ввиду большого количества различных возможных комбинаций материалов III-V группы которые пригодны для создания наноразмерных гетероструктур выступающих в качестве ячейки хранения информации эта технология имеет существенный потенциал [4]. Помимо длительного времени хранения, память на основе квантовых точек может обеспечить высокое быстродействие. В данной работе исследуется возможность создания элемента флеш-памяти на основе транзистора с модулированным легированием за счет применения в его структуре слоя квантовых точек (либо, в перспективе, одной квантовой точки). Структура транзистора с модулированным легированием обеспечивает высокое быстродействие, а квантовые точки выполняют функцию ячеек хранения информации.

### УСТРОЙСТВО ФЛЕШ-ПАМЯТИ НА САМООРГАНИЗОВАННЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧКАХ

Для организации массива квантовых точек, на данный момент наиболее применим метод самосогласованного роста по механизму Странского - Крастанова, так как он технически отработан и хорошо изучен в современной микроэлектронике [5]. Причиной образования квантовых точек в процессе самоорганизации является уменьшение энергии деформации. Так, если на подложке из арсенида галлия растить слой арсенида индия, параметры решетки которого больше, то возникнут упругие напряжения, приводящие к росту островков (квантовых точек) InAs на поверхности GaAs. Поверхность покрывается пирамидками InAs с размерами в несколько нанометров. Оказывается более выгодным формирование островков по сравнению с однородно-напряженной поверхностью. Рост пирамид происходит до полного снятия упругого напряжения на вершине пирамиды. Образование согласованно-напряженных островков на поверхности зависит от двух параметров: рассогласования решеток и количества осажденного на поверхность материала. Минимум энергии соответствует образованию одинаковых по размеру и форме островков. Таким образом, при применении молекулярно-лучевой эпитаксии можно получить массив квантовых точек с минимальным разбросом параметров и пригодным для применения в микроэлектронике [3] (см. рис. 1).

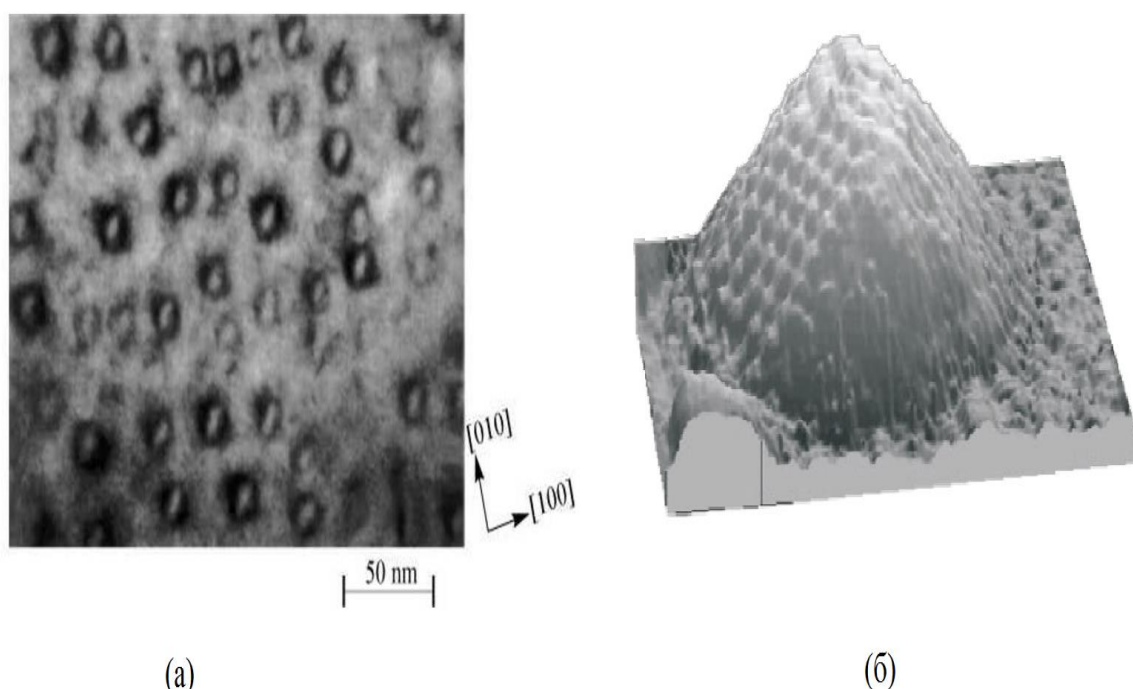


Рис. 1. Квантовые точки InAs в матрице GaAs, где (а) – массив КТ, (б) увеличенная КТ

Использование полупроводниковых соединений III-V группы в отличие от системы кремний/диоксид кремния позволяет проектировать необходимую форму зонной структуры за счет введения неоднородностей в структуру элемента. Существует широкое разнообразие бинарных соединений III-V группы многие из которых можно в различных пропорциях комбинировать друг с другом (см. рис.2) для получения необходимых параметров [4]. Кроме того, соединения III-V группы могут быть легированы для изменения структуры энергетических зон, что невозможно в SiO<sub>2</sub>.

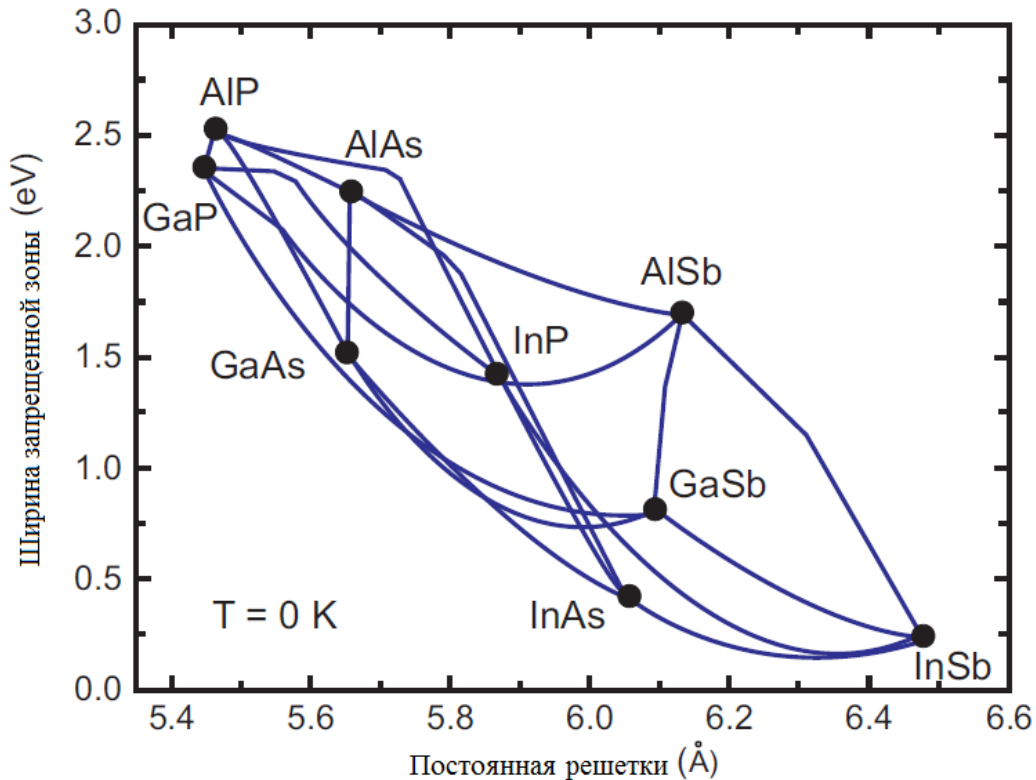


Рис. 2. Зависимость ширины запрещенной зоны от постоянной решетки для различных полупроводниковых соединений III-V группы. Черные точки – бинарные соединения, синие линии – тройные.

Использование квантовых точек в элементе флэш-памяти даёт много преимуществ. Во время роста квантовых точек, полная энергия сводится к минимуму (рост КТ происходит до полного снятия упругого напряжения на вершине пирамиды), что приводит к минимизации количества деформаций и дислокаций на поверхностном слое полупроводника, на котором выращены квантовые точки [6] (который выполняет роль подложки для них). Это приводит к очень высоким значениям энергии локализации в квантовых точках, даже если система КТ/полупроводниковая подложка весьма напряжена (ввиду разницы в значениях постоянной решетки необходимой для возможности самосогласованного роста квантовых точек по механизму Странского - Крастанова [5]). Это позволяет комбинацию материалов, которые имеют большое рассогласование параметров решеток. Кроме того, большое сечение захвата носителей заряда в квантовых точках (обычно, от  $10^{-14}$  до  $10^{-12}$  см<sup>2</sup>), которое на порядок больше, чем для обычных ловушек в полупроводниках [7], приводит к очень малому времени захвата для электронов и дырок с временными масштабами в диапазоне от пикосекунд [8]. Это может обеспечить очень высокую скорость записи информации в флэш-памяти на КТ сопоставимую с быстродействием современных ДОЗУ. Квантовые точки также позволяют использовать дырки в качестве носителей информации, что обеспечивает большее время хранения информации из-за большей эффективной массы дырок по сравнению с электронами и ввиду более низкой вероятности их туннелирования [9].

Применение квантовых точек в модулированно легированном полевом транзисторе (MODFET) позволяет использовать его структуру в качестве элемента памяти. Квантовые точки являются слоем нанесенным выше полупроводникового слоя в котором образуется двумерный электронный газ в MODFET. Заряды внутри квантовых точек снижают подвижность двумерного газа и уменьшают плотность его носителей заряда за счет эффекта поля [10]. Следовательно, логическое состояние хранящееся в квантовых точках (ноль или единица) может быть обнаружено путем измерения тока сток/исток.

Структура элемента памяти на основе КТ схематически показана на рис. 3. Она состоит из слоя самоорганизованных квантовых в структуре полевого транзистора с модулированным легированием (MODFET), с большей шириной запрещенной зоны чем у материала КТ (к примеру, массив InSb КТ в структуре GaAs/AlGaAs). Квантовые точки являются ячейками хранящими заряд, используемыми в качестве носителей информации, в то время как структура MODFET используется для выполнения операций с памятью, таких как запись, считывание и стирание информации из КТ.

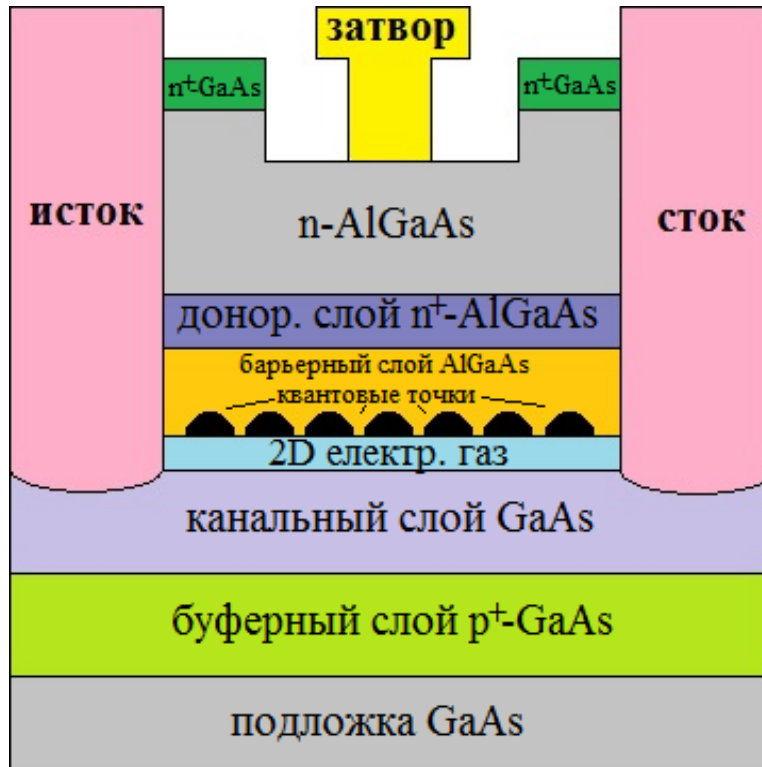


Рис. 3. Пример ячейки флэш-памяти на КТ на основе структуры GaAs/AlGaAs MODFET транзистора

### ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТА ФЛЭШ-ПАМЯТИ НА ОСНОВЕ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК

Операции с памятью для устройства ячейки флэш-памяти на основе КТ, использующего дырки в качестве носителей информации, схематически показаны на рис. 4. В режиме хранения информации (рис. 4 (а)), когда логическая единица записана в квантовых точках (заполненные КТ), потенциальный барьер, формирующийся удерживающим потенциалом (энергией локализации) в КТ, предотвращает утечку дырок из квантовых точек, а, если хранится логический ноль, потенциальный барьер необходим для того, чтобы не допустить проникновение дырок из окружающего слоя внутрь квантовых точек. В режиме записи информации (рис. 4 (б)) для того, чтобы зарядить КТ, прикладывается такое напряжение прямого смещения на затвор, что энергетические уровни квантовых точек полностью выше уровня Ферми, и дырки захватываются из валентной зоны окружающей КТ. Этот процесс захвата чрезвычайно быстрый, потенциально достигая уровня нескольких пикосекунд при комнатной температуре [11]. Для стирания информации (рис. 4 (в)) прикладывается напряжение обратного смещения затвора. Увеличивается изгиб зон вокруг квантовых точек, что делает потенциальный барьер более узким. Это повышает вероятность туннелирования, и дырки из квантовых точек туннелируют через барьер в валентную зону. Считывание информации с квантовых точек осуществляется с помощью измерения тока сток-исток. При хранении логической единицы в КТ уменьшается концентрация носителей заряда в слое двумерного электронного газа и их подвижность внутри канала, что напрямую видно по значению тока сток-исток.

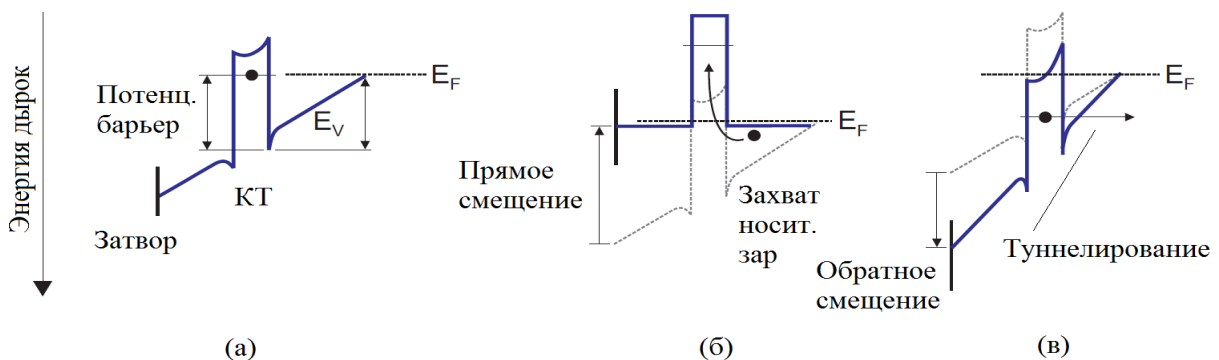


Рис. 4. Схема функционирования элемента памяти на основе квантовых точек, использующего для хранения информации дырки

### 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 квантовых точек, 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 данной технологии. Для организации массива квантовых точек, на данный момент наиболее применим метод самосогласованного роста по механизму Странского - Крастанова, так как он технически отработан и хорошо изучен в современной микроэлектронике. 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.

Рассмотренная в данной работе схематическая модель показывает принципиальную возможность создания элемента флэш-памяти на основе внесения в конструкцию модулировано-легированного транзистора дополнительного слоя самоорганизованных квантовых точек, выполняющих функцию ячейки памяти. Применения структуры модулировано-легированного транзистора обеспечивает высокое быстродействие, за счет высокой подвижности носителей заряда, а квантовые точки – длительное время хранения информации благодаря квантовым эффектам, свойственным наноструктурам с размерами, сопоставимыми с размером волны Де Бройля.

Цикл перезаписи в ячейке памяти на основе квантовой точки осуществляется изменением напряжения на затворе, так же, как и в традиционной флеш-памяти.

Разработанная структурная схема позволяет проведение дальнейших исследований по данной тематике за счет подбора оптимальных пар материалов квантовой точки/окружающего полупроводникового слоя, за счет математического моделирования и подбора эмпирических данных.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макушин М. Рынок полупроводникового оборудования перспективы и экономические аспекты развития литографии. - Электроника: НТБ, 2010, №2.
2. L. Geppert. "The new indelible memories—it's a three-wayrace in the multibillion-dollar memory sweepstakes," IEEE Spectrum. – 2003.– Vol. 40, No. 3/ – P.p. 48–54.
3. Демиховский, В.Я., Вугальтер Г.А. Физика квантовых низкоразмерных структур. – М.: Логос, 2000. – 57 с.
4. Астахов, М.В. Перспективные материалы. — М.В. Астахов, А.В. Белый, Н.Е. Капуткина. – Витебск: УО "ВГТУ Витебск", 2009. – 76 с.
5. Оура К., Лифшиц В. Г., Саранин А. А. и др. Введение в физику поверхности. Под ред. В. И. Сергиенко. – М.: Наука. – 2006. – 490 с.
6. Эсаки, Л. Молекулярно-лучевая эпитаксия и развитие технологии полупроводниковых сверхрешеток и структур с квантовыми ямами В кн: Молекулярно-лучевая эпитаксия и гетероструктуры.: Пер. с англ. - Под ред. Л. Ченга, К Плога, Л. Эсаки. - М.: Мир, 1989.
7. T. Muller, F. F. Schrey, G. Strasser, and K. Unterrainer, Ultrafast intraband spectroscopy of electron capture and relaxation in InAs/GaAs quantum dots, Appl. Phys. Lett. 83(17), 2003.
8. M. Geller, A. Marent, E. Stock, D. Bimberg, V. I. Zubkov, I. S. Shulgunova, and A. V. Solomonov, Hole capture into self-organized InGaAs quantum dots, Appl. Phys. Lett. 89(23), 2006.
9. Слабый К.Г. Распределение зарядов в структуре элемента энергонезависимой памяти на основе квантовой точки - 19-й международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке»: Сб. материалов форума.- Харьков: ХНУРЭ, 2015.
10. Астахов, М.В., Белый А.В., Капуткина Н.Е. – Перспективные материалы. – Витебск: УО "ВГТУ Витебск", 2009.
11. Слабый К.Г. Ячейка флеш-памяти на основе квантовой точки - VIII международная научная конференция «Функциональная база наноэлектроники»: Сб. научных трудов. – Харьков: ХНУРЭ, 2015.