

Формирование самоорганизованных квантовых точек в ходе осаждения GaSbP на поверхность AlP

© Д.С. Абрамкин^{1,2}, М.О. Петрушков¹, Д.Б. Богомолов¹, Е.А. Емельянов¹,
М.А. Путьято¹, В.В. Преображенский¹

¹ Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук,
630090 Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный университет,
630090 Новосибирск, Россия
E-mail: dalamber.07@mail.ru

Поступила в Редакцию 15 апреля 2024 г.

В окончательной редакции 20 июня 2024 г.

Принята к публикации 20 июня 2024 г.

Методом дифракции быстрых электронов на отражение исследован процесс формирования самоорганизованных массивов GaSbP-квантовых точек на поверхности AlP(100) из потоков молекул Sb₄, P₂ и атомов Ga. Изучены зависимости критической толщины зарождения квантовых точек ($D_{\text{эф}}$), величины упругих деформаций в квантовых точках и состава твердого раствора GaSbP, из которого формируются квантовые точки, от температуры подложки (T_s) и соотношения давлений в потоках молекул Sb₄ и P₂ ($P(\text{Sb}_4) : P(\text{P}_2)$). Обнаружено, что в широких диапазонах значений T_s и $P(\text{Sb}_4) : P(\text{P}_2)$ (380–460 °C и 0.07–27 соответственно) формируются ненапряженные GaSbP/Al-квантовые точки.

Ключевые слова: квантовые точки, молекулярно-лучевая эпитаксия, твердый раствор, пластическая релаксация деформаций.

DOI: 10.61011/FTP.2024.04.58542.6330H

1. Введение

Энергетический спектр носителей заряда в низкоразмерных полупроводниковых гетероструктурах существенно отличается от спектра носителей заряда в объемных материалах благодаря эффектам размерного квантования [1]. Полная трехмерная локализация носителей заряда в полупроводниковых самоорганизованных квантовых точках (КТ) делает возможным длительное хранение заряда в них [2,3]. Продолжительность хранения определяется энергией локализации носителя заряда (E_{loc}) и сечением захвата в КТ [4,5]. Это свойство КТ открывает перспективу использования массивов КТ в качестве плавающего затвора в элементах флеш-памяти. В работе [6] обсуждается создание прототипа элемента памяти, основанного на InAs/AlGaAs-гетероструктурах с КТ. Преимущество использования III–V материалов для создания ячеек флеш-памяти по сравнению с традиционными Si/SiO_x-структурами заключается в возможности организации прямого захвата носителей заряда в КТ при записи заряда на плавающий затвор. Это приводит к тому, что время записи информации ограничивается лишь временем релаксации энергии носителей заряда при захвате в КТ, составляющим ~ 1 пс [7], что на несколько порядков величины быстрее, чем в традиционных Si/SiO_x флеш-ячейках. Кроме того, отсутствие необходимости создания горячих носителей заряда при записи заряда в III–V КТ существенно увеличивает ресурс использования ячеек флеш-памяти, основанных на таких гетероструктурах. Таким образом, использование III–V гетероструктур с КТ открывает перспективу создания универсальной памяти, сочетающей в себе

высокое быстродействие и возможность длительного хранения информации.

Первые прототипы, обсуждаемые в работе [6], характеризовались весьма коротким временем хранения заряда в КТ, ~ 10 мс. Это вызвано недостаточной E_{loc} , составляющей ~ 0.8 эВ. Таким образом, актуальной задачей стало получение и исследование новых III–V гетероструктур с КТ, характеризующихся большей E_{loc} . На этом пути были исследованы многие гетеросистемы, такие как GaSb/GaAs [8–10], GaSb/AlAs [11–13], InSb/AlAs [14–16], GaAs/GaP [17,18], InAs/GaP [19–21], GaSb/GaP [22–24], InGaSb/GaP [25,26] и GaSb/AlP [27,28]. Наиболее перспективной гетеросистемой является GaSb/AlP. Первые экспериментальные результаты [28], касающиеся получения таких КТ, показали, что при осаждении GaSb на поверхности AlP происходит формирование GaSb/AlP КТ, механические напряжения в которых полностью релаксировали за счет введения дислокаций. Эти КТ характеризуются E_{loc} дырок на уровне 1.65–1.70 эВ, что позволяет ожидать время хранения заряда в КТ $\gg 100$ лет. Однако вопрос о том, оказывают ли дислокации в КТ негативное влияние на длительность хранения заряда, остается открытым. В то же время наши теоретические расчеты [27] показывают, что в псевдоморфно-напряженных КТ E_{loc} может достигать еще больших значений, вплоть до 2.04 эВ. Кроме того, отсутствие дислокаций в кристаллически совершенных КТ позволит исключить фактор влияния дислокаций на длительность хранения заряда в КТ. Таким образом, приоритетной задачей является формирование гетероструктур с псевдоморфно-напряженными КТ.