

08

Регулярные массивы тройных квантовых точек InAs/GaAs в треугольной конфигурации

© С.В. Балакирев, Д.В. Кириченко, Н.Е. Солодовник, Н.А. Шандыба, Д.Д. Духан, М.М. Ерёменко, М.С. Солодовник

Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного федерального университета, Таганрог, Россия
E-mail: sbalakirev@sfedu.ru, solodovnikms@sfedu.ru

Поступило в Редакцию 29 января 2026 г.

В окончательной редакции 26 февраля 2026 г.

Принято к публикации 27 февраля 2026 г.

Впервые представлен подход, позволяющий эпитаксиально выращивать упорядоченные массивы тройных квантовых точек, расположенных в форме треугольника. Предложенный подход заключается в предварительном структурировании подложек GaAs(111)B с использованием комбинации фокусированных ионных пучков и локального капельного травления и последующего осаждения InAs методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Оптимизация технологических режимов позволяет достичь высокой селективности и выхода тройных квантовых точек в массиве, а также контролировать расстояние между ними.

Ключевые слова: молекулярно-лучевая эпитаксия, фокусированные ионные пучки, наноструктурирование, квантовые точки.

DOI: 10.21883/0000000000

В последнее время тройные квантовые точки (КТ) в различных конфигурациях вызывают все больший интерес, что связано с их уникальными физическими свойствами и значительным потенциалом применения в перспективных устройствах нано- и оптоэлектроники, плазмоники и квантовых технологий [1–3]. Одной из наиболее распространенных конфигураций является цепочка линейно расположенных тройных КТ, позволяющих, в частности, реализовать управление тремя индивидуальными спинами и когерентный транспорт электронов между двумя удаленными КТ [4,5]. Однако теоретические [1,3,6] и экспериментальные [7,8] исследования демонстрируют, что треугольное расположение тройных КТ обеспечивает ряд дополнительных преимуществ, связанных с возможностью реализации фрустрации заряда [1,8], повышения надежности квантовой телепортации [6], а также степени запутанности кубитов [3].

Наиболее распространенным способом изготовления комплексов КТ с управляемой конфигурацией является литографическое формирование металлических затворов над полупроводниковым слоем с двумерным электронным газом [4,7,8]. Однако такой подход отличается рядом существенных недостатков, таких как сложность и дороговизна, чувствительность КТ к зарядовому шуму и флуктуации положения энергетических уровней [9]. В то же время эпитаксиальные КТ представляют собой практически идеальные элементы нанофотоники, обладающие требуемыми оптическими свойствами и возможностью произвольного уменьшения размеров КТ без значительного усложнения процесса их изготовления. При этом молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ) обеспечивает высочайшее качество и чистоту материала,

а также резкие гетероинтерфейсы. Однако вопросы, связанные с разработкой масштабируемых подходов эпитаксиального формирования КТ в предварительно заданных позициях, по-прежнему остаются открытыми.

В существующих работах особое внимание уделяется системам на основе InAs, что обусловлено их высоким потенциалом для фотоники в области телекоммуникационных длин волн, малой эффективной массой носителей заряда, сильным спин-орбитальным взаимодействием и другими преимуществами [10,11]. Одним из вариантов экспериментальной реализации линейных тройных КТ является использование нанопроволок InAs, к которым прикладывается напряжение с помощью поперечно размещенных удлиненных затворов [12]. Комбинацией методов локального капельного травления (ЛКТ) галлием и последующего осаждения InAs были также сформированы квантово-точечные молекулы InGaAs [13]. Однако эпитаксиальный рост тройных КТ, расположенных в форме треугольника, насколько нам известно, до сих пор реализован не был. Более того, отсутствуют свидетельства демонстрации способов масштабируемого изготовления упорядоченных массивов таких КТ.

В настоящей работе представлен подход к изготовлению упорядоченных массивов эпитаксиальных тройных КТ InAs в треугольной конфигурации. Для изготовления таких КТ используются подложки GaAs(111)B, подвергшиеся модификации с использованием комбинации методов фокусированных ионных пучков (ФИП) и ЛКТ, приводящей к образованию регулярных массивов пирамидальных углублений. Осаждение InAs приводит к преимущественному зарождению островков в вершинах основания пирамиды, что обеспечивает формирование треугольных комплексов КТ.

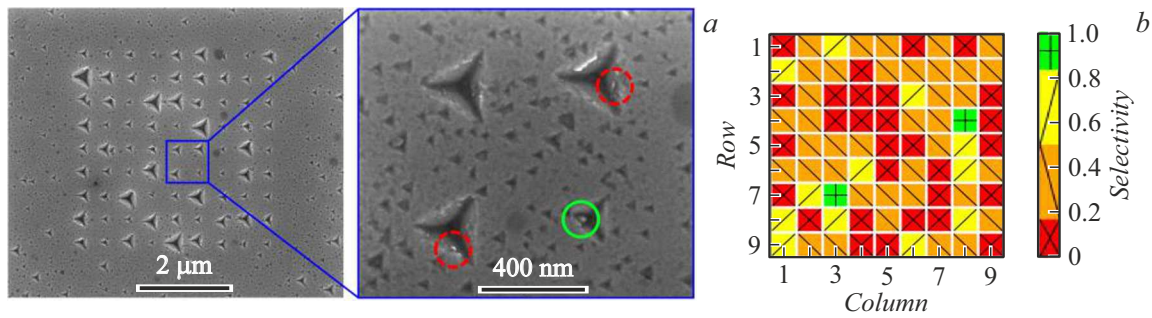


Рис. 1. СЭМ-изображения (а) и карта селективности тройных КТ (b) в массиве углублений, полученных после ФИП-модификации подложки при $U = 10 \text{ kV}$ и $N = 1$. Красные ячейки с перекрестной диагональной штриховкой на карте соответствуют нулевой селективности ($\theta = 0$), когда КТ не образуются в боковых вершинах пирамидального углубления; оранжевые и желтые ячейки с левой и правой диагональной штриховкой соответственно обозначают углубления с одной и двумя КТ в боковых вершинах ($\theta = 0.33$ и 0.67); зеленые ячейки с вертикально-горизонтальной штриховкой соответствуют углублениям, в которых сформированы ровно три КТ в боковых вершинах ($\theta = 1$). Цветной вариант рисунков представлен в электронной версии статьи.

Для исследований использовались подложки GaAs с ориентацией (111)В класса „epi-ready“. Модификация поверхности осуществлялась в сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Nova NanoLab 600, оснащенном колонной ФИП с источником ионов Ga^+ . Точки ФИП-модификации располагались на расстоянии $0.5 \mu\text{m}$ друг от друга в пределах квадратной матрицы площадью $4 \times 4 \mu\text{m}$. Ускоряющее напряжение ионного пучка (U) составляло 10 и 30 кВ. Доза ионного облучения контролировалась путем изменения числа проходов ионного пучка N . После ФИП-модификации подложки помещались в камеру роста системы МЛЭ SemiTEq STE 35 и отжигались в потоке As_4 при температуре 600°C . На следующем этапе на структурированную поверхность осаждался InAs толщиной 2.5 монослоя при температуре 500°C для формирования КТ. Морфология образцов исследовалась посредством атомно-силовой микроскопии и СЭМ.

Непосредственно после ФИП-обработки на поверхности GaAs(111)В формировались регулярные массивы однородных по форме и размеру углублений. При увеличении числа проходов ФИП от 1 до 60 диаметр углублений монотонно возрастает от ~ 50 до $\sim 120 \text{ nm}$. Аналогичным образом изменяется и глубина участков модификации, достигая 30 nm при 60 проходах ФИП. Значительные изменения размера и формы углублений происходят после отжига ФИП-модифицированных подложек, приводящего к локальному травлению участков воздействия ФИП каплями галлия, механизмы которого были подробно рассмотрены в нашем предыдущем исследовании [14]. Углубления, сформированные в точках ФИП-модификации, приобрели выраженную форму пирамид (тетраэдров) с высокой симметрией и увеличенным размером: в диапазоне проходов ФИП от 5 до 60 диаметр монотонно возрастает от ~ 190 до $\sim 290 \text{ nm}$. Такое значительное растравливание поверхности связано с высокой концентрацией галлия, внедренного в точках воздействия ФИП.

Углубления, полученные при малых N , обладают большим разбросом по размерам: при $N = 1$ среднеквадратичное отклонение диаметра углублений составляет 150 nm , тогда как при более высоких значениях (от 5 до 60) оно варьируется от 8 до 21 nm . Кроме того, при малых N массивы могут содержать углубления как малого, так и очень большого размера (диаметром до $\sim 410 \text{ nm}$), недостижимого в случае высоких N (рис. 1, а). При увеличении N однородность процесса ЛКТ возрастает, что связано со стабилизацией травления конкурирующим процессом кристаллизации травящего материала (галлия) в потоке фонового мышьяка, неизбежно присутствующего в камере роста.

Осаждение 2.5 монослоя InAs привело к формированию хорошо различимых островков в вершинах оснований пирамидальных углублений (отмеченных зелеными сплошными окружностями на рис. 1, а и 2, а). Островки InAs могут формироваться также в других позициях: в центре углубления, вдоль стыков граней либо на самих гранях пирамиды (отмеченных красными штриховыми окружностями на рис. 1, а). Однако в контексте настоящей работы, целью которой является формирование тройных КТ в треугольной конфигурации, такая нуклеация рассматривается как нежелательная.

Рис. 1, а демонстрирует, что, несмотря на то что углубления в массиве, сформированном при $N = 1$, отличаются значительным разбросом по размерам, они также имеют форму полных или усеченных пирамид и содержат наноструктуры InAs преимущественно в вершинах их оснований (боковых вершинах). Повышенная вероятность зарождения КТ в вершинах оснований пирамид объясняется наличием выступающих граней, препятствующих поверхностной диффузии атомов из углубления.

Для количественной оценки степени селективности θ тройных КТ в углублениях в данном исследовании используется формула $\theta = n / \max(N_{\text{tot}}, 3)$, где n — количество КТ в боковых вершинах, N_{tot} — общее количество

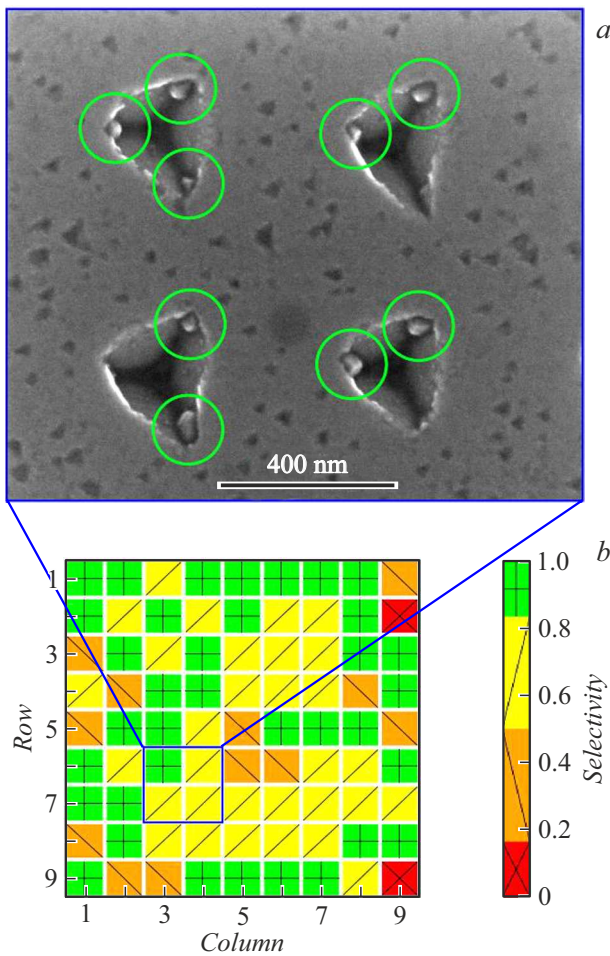


Рис. 2. СЭМ-изображение (a) и карта селективности тройных КТ (b) в массиве углублений, полученных после ФИП-модификации подложки при $U = 10$ kV и $N = 20$.

КТ в углублении, $\max(N_{tot}, 3) = 3$, если $N_{tot} \leq 3$, и N_{tot} , если $N_{tot} > 3$. В соответствии с этой формулой селективность максимальна (равна единице), когда в вершинах основания пирамидального углубления формируются ровно три КТ, а в остальных случаях она снижается либо из-за отсутствия КТ в требуемых позициях, либо из-за присутствия паразитных КТ за пределами боковых вершин.

Визуализировать селективность КТ в массиве удобно с помощью специальных карт, цвет и штриховка ячеек на которых определяются значением селективности КТ. Карта селективности тройных КТ для образца с $N = 1$ (рис. 1, b) демонстрирует, что массив содержит только 2% углублений с тройными КТ ($\theta = 1$), тогда как в остальных углублениях сформировано не более двух КТ. Метрика, характеризующая долю тройных КТ в массиве, в настоящей работе называется выходом тройных КТ. Рис. 3, a демонстрирует, что максимальная средняя селективность и выход тройных КТ при 10 kV составляют 0.76 и 49% соответственно. Карта селективности для $N = 20$ представлена на рис. 2, b и также указывает на

то, что тройные КТ формируются преимущественно по периметру массива, что связано с аккумулярованием материала, осаждаемого за пределами ФИП-модифицированной области, крайними углублениями и заполнением островками всех наиболее предпочтительных центров нуклеации. В диапазоне чисел проходов от 10 до 60 средняя селективность тройных КТ при 10 kV варьируется в пределах 0.72–0.76, уменьшаясь до 0.62 при пяти ($N = 5$) и до 0.29 при одном ($N = 1$) проходе ФИП (рис. 3, a). При этом выход углублений с тройными КТ равен 2% при одном проходе ФИП и находится в диапазоне 27–49% в остальном диапазоне N .

Зависимости на рис. 3, b демонстрируют, что увеличение ускоряющего напряжения ФИП до 30 kV приводит к значительному увеличению как средней селективности, так и выхода тройных КТ, которые достигают значений 0.93 и 78% соответственно для числа проходов ФИП $N = 20$ (рис. 4, b). При увеличении числа проходов ФИП вероятность зарождения островков в боковых вершинах углублений возрастает, однако повышение обеих рассматриваемых величин ограничено нуклеацией в центре углубления (островки, отмеченные стрелками на рис. 4, a). В контексте настоящей работы КТ в таком случае считаются паразитными и снижают селективность с 1 до 0.75, уменьшая также и значение выхода тройных КТ в массиве. Зарождением КТ в центре углублений объ-

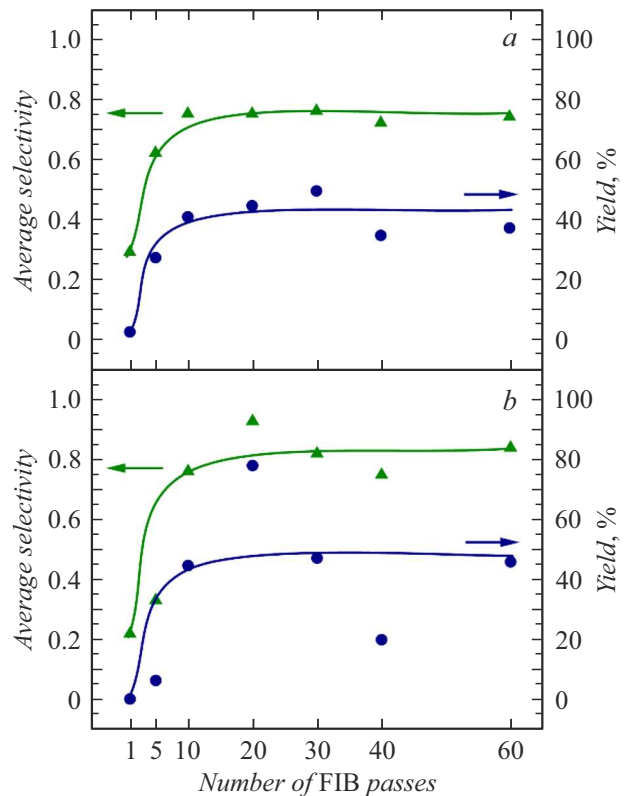


Рис. 3. Зависимости средней селективности и выхода тройных КТ от числа проходов ФИП при $U = 10$ (a) и 30 kV (b). Кривые проведены как визуальные направляющие.

ясняется значительный спад выхода при 40 проходах ФИП (рис. 3, *b*). При 60 проходах выход КТ снова стабилизируется, что связано с появлением кратера в центре пирамидальных углублений, обусловленного большой глубиной ионной имплантации при 30 кВ и связанным с ней глубоким травлением подложки каплями галлия.

Минимальное значение средней селективности тройных КТ в случае 30 кВ составляет 0.22 (при $N = 1$), тогда как при значениях N в диапазоне от 10 до 60 селективность колеблется от 0.75 до 0.93 (рис. 3, *b*). При этом если при $N = 1$ выход тройных КТ нулевой, то при $N = 20$ он достигает 78%. Важно также отметить, что доля углублений, содержащих хотя бы по одной КТ в боковых вершинах углублений, составляет 96–100% для 10 кВ и 98–100% для 30 кВ в диапазоне N от 10 до 60.

Помимо повышения селективности тройных КТ в углублениях важным следствием увеличения напряжения ФИП является возможность снижения среднего

расстояния между КТ в треугольном комплексе. Если при 10 кВ среднее расстояние между КТ при $N = 30$ составляет ~ 210 нм, то при 30 кВ оно снижается до ~ 100 нм.

Таким образом, в работе продемонстрирован подход к изготовлению упорядоченных массивов тройных КТ InAs, расположенных в форме треугольника, на структурированной поверхности GaAs(111)В. Полученные комплексы тройных КТ могут быть использованы в качестве объекта фундаментальных исследований, а также для изготовления перспективных устройств наноэлектроники и квантовых технологий.

Благодарности

Исследование проведено с использованием оборудования Центра коллективного пользования „Передовые технологии микро- и оптоэлектроники“ в Южном федеральном университете.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10313 (<https://rscf.ru/project/23-79-10313/>) в Южном федеральном университете (рост квантовых точек) и при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания в сфере научной деятельности № FENW-2025-0004 (подготовка поверхности и карт селективности).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Y. Qi, J.-H. Wei, *Chin. Phys. B*, **33** (5), 057301 (2024). DOI: 10.1088/1674-1056/ad2d54
- [2] H. Rahman, I. Khan, S. Yousaf, H. Bibi, S. Ali, H. Ali, S. Haddadi, *Phys. Lett. A*, **475**, 128864 (2023). DOI: 10.1016/j.physleta.2023.128864
- [3] J. Li, S. Dong, J. Wei, *Chin. Phys. B*, **35** (2), 020302 (2026). DOI: 10.1088/1674-1056/adeec5d
- [4] A. Noiri, J. Yoneda, T. Nakajima, T. Otsuka, M.R. Delbecq, K. Takeda, S. Amaha, G. Allison, A. Ludwig, A.D. Wieck, S. Tarucha, *Appl. Phys. Lett.*, **108**, 153101 (2016). DOI: 10.1063/1.4945592
- [5] Y. Wang, J. Ding, D. Wang, *Eur. Phys. J. D*, **74** (9), 190 (2020). DOI: 10.1140/epjd/e2020-100537-x
- [6] J. Li, Y. Qi, Y. Wang, J. Wei, *Quantum Inf. Process.*, **24** (8), 241 (2025). DOI: 10.1007/s11128-025-04856-w
- [7] A. Noiri, K. Kawasaki, T. Otsuka, T. Nakajima, J. Yoneda, S. Amaha, M.R. Delbecq, K. Takeda, G. Allison, A. Ludwig, A.D. Wieck, S. Tarucha, *Semicond. Sci. Technol.*, **32** (8), 084004 (2017). DOI: 10.1088/1361-6641/aa7596
- [8] M. Seo, H.K. Choi, S.-Y. Lee, N. Kim, Y. Chung, H.-S. Sim, V. Umansky, D. Mahalu, *Phys. Rev. Lett.*, **110** (4), 046803 (2013). DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.046803

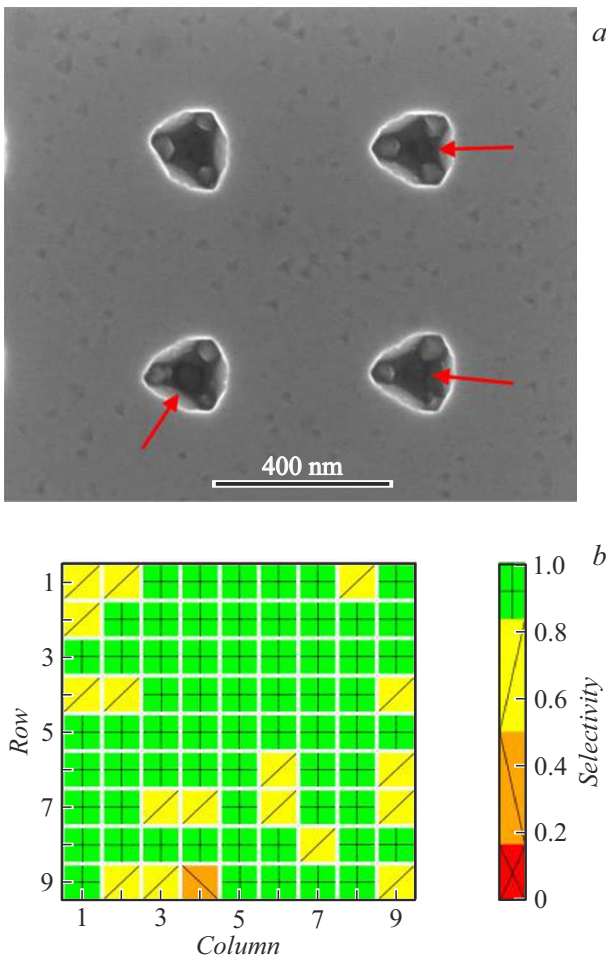


Рис. 4. СЭМ-изображение (*a*) и карта селективности тройных КТ (*b*) в массиве углублений, полученных после ФИП-модификации подложки при $U = 30$ кВ и $N = 30$ (*a*) и 20 (*b*). Стрелками отмечены паразитные КТ, зарождающиеся в центре углублений.

- [9] S.W. Jung, T. Fujisawa, Y. Hirayama, Y.H. Jeong, *Appl. Phys. Lett.*, **85** (5), 768 (2004). DOI: 10.1063/1.1777802
- [10] K.D. Zeuner, K.D. Jöns, L. Schweickert, C. Reuterskiöld Hedlund, C. Nuñez Lobato, T. Lettner, K. Wang, S. Gyger, E. Schöll, S. Steinhauer, M. Hammar, V. Zwiller, *ACS Photon.*, **8** (8), 2337 (2021). DOI: 10.1021/acsp Photonics.1c00504
- [11] S. Csonka, L. Hofstetter, F. Freitag, S. Oberholzer, C. Schönenberger, T.S. Jespersen, M. Aagesen, J. Nygård, *Nano Lett.*, **8** (11), 3932 (2008). DOI: 10.1021/nl802418w
- [12] W. Li, J. Mu, S. Huang, D. Pan, J. Zhao, H.Q. Xu, *Appl. Phys. Lett.*, **117** (26), 262102 (2020). DOI: 10.1063/5.0032832
- [13] E. Zallo, P. Atkinson, L. Wang, A. Rastelli, O.G. Schmidt, *Phys. Status Solidi B*, **249** (4), 702 (2012). DOI: 10.1002/pssb.201100772
- [14] S.V. Balakirev, N.E. Chernenko, E.A. Lakhina, D.V. Kirichenko, N.A. Shandyba, D.D. Dukhan, M.M. Eremenko, M.S. Solodovnik, *Nanotechnol. Russ.*, **19** (S1), S37 (2024). DOI: 10.1134/S2635167624602341