

Лахина Екатерина Александровна, Черненко Наталия Евгеньевна,
Кириченко Данил Владимирович, Шандыба Никита Андреевич,
Балакирев Сергей Вячеславович, Солодовник Максим Сергеевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ОТЖИГА ПОДЛОЖКИ GaAs(111) НА ХАРАКТЕРИСТИКИ НАНОУГЛУБЛЕНИЙ, ФОРМИРУЕМЫХ ФОКУСИРОВАННЫМИ ИОННЫМИ ПУЧКАМИ

В данной работе проводится исследование влияния технологических режимов отжига подложек GaAs(111) на геометрические характеристики нанорулублений, формируемых фокусированными ионными пучками. В отсутствие отжига и при отжиге в отсутствие потока мышьяка глубина и латеральный размер нанорулублений увеличиваются с увеличением количества проходов ионного пучка. В случае отжига подложек в потоке мышьяка зависимости глубины и латерального размера нанорулублений от количества проходов пучка являются немонотонными, что объясняется конкуренцией процессов травления поверхности каплями галлия при термическом сгоне окисла и кристаллизации капель в потоке мышьяка. Продемонстрированы технологические условия, позволяющие формировать высокосимметричные нанорулубления в форме треугольных пирамид.

Фокусированный ионный пучок, отжиг, GaAs(111), нанотехнология.

Lakhina Ekaterina Alexandrovna, Chernenko Natalia Evgenyevna,
Kirichenko Danil Vladimirovich, Shandyba Nikita Andreyevich,
Balakirev Sergey Vyacheslavovich, Solodovnik Maxim Sergeyevich

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF ANNEALING MODES OF THE GaAs(111) SURFACE ON THE CHARACTERISTICS OF NANOHOLE FORMED BY FOCUSED ION BEAMS

In this paper, we study the effect of annealing of GaAs(111) substrates under various conditions on the morphological characteristics of nanoholes formed by focused ion beams. In the absence of annealing and when annealing in the absence of the arsenic flux, the depth and lateral size of nanoholes increase with the number of ion beam passes. In the case of annealing of the substrates in the arsenic flux, the dependences of the hole depth and lateral size on the number of beam passes is non-monotonic, which is attributed to the competition of the processes of surface etching by gallium droplets during thermal oxide removal and droplet crystallization in the arsenic flux. We demonstrate technological conditions enabling formation of highly symmetric nanoholes in the form of triangular pyramids.

Focused ion beam, annealing, GaAs(111), nanotechnology.

Введение

Источники одиночных и запутанных пар фотонов [1,2] в последнее время вызывают повышенный интерес в связи с возможностью их использования в квантовой связи и квантовых вычислениях [3,4]. В роли таких источников могут выступать эпитаксиально выращиваемые квантовые точки (КТ) InAs, формируемые на подложках GaAs [5]. При этом наиболее важное значение имеют КТ с симметрией C_{3v} , которые могут быть реализованы на поверхностях с ориентацией (111) [6]. Такие КТ позволяют получить наименьшую величину расщепления тонкой структуры (fine structure splitting, FSS), что способствует высокой степени запутанности пар фотонов [7].

Изготовление структур с КТ посредством кристаллического роста в последнее время вызывает большой интерес [8,9]. Среди различных технологий изготовления таких структур выделяют следующие методы роста: молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ) и газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений, которые позволяют сформировать интерфейсы гетероструктур практически идеальными, а размер наноструктур – контролируемым. Для точного контроля процесса роста наноструктур необходимо

понять механизм роста и происходящие во время него процессы. Ожидается, что у квантоворазмерных структур, создаваемых *in situ* исключительно путем роста кристаллов и последующего заравнивания покровными слоями [10], минимизированы дефектность и степень загрязнения примеси, приводящие к ухудшению люминесцентных свойств и характерные для структур, создаваемых *ex situ*. Рост КТ InAs на поверхностях (111) затруднен в связи с невозможностью реализации на них традиционно используемого механизма Странского-Крастанова [11]. В данном случае для формирования КТ на поверхности (111) вытравливаются мезы [12] или формируются наноглубления, которые в дальнейшем являются центрами зарождения КТ [7].

Несмотря на повышенный интерес к данной теме, до сих пор не были представлены результаты исследований формирования на поверхности GaAs(111) углублений – центров зарождения КТ – методом фокусированных ионных пучков (ФИП) с последующим отжигом в камере МЛЭ для восстановления нарушенных кристаллических областей.

Постановка задачи

Целью данной работы является исследование технологических режимов, с помощью которых формируются симметричные наноглубления, полученные посредством сгона окисла с поверхности в области модификации фокусированным ионным пучком и вне. Для достижения поставленной цели необходимо учитывать ряд параметров, влияющих на механизмы травления поверхности и последующего формирования наноглублений: поток мышьяка в камере, температура подложки, температура и время отжига образца и др.

Описание эксперимента

Модификация подложек GaAs(111) фокусированным ионным пучком (ФИП) проводилась на растровом электронном микроскопе (РЭМ) Nova NanoLab 600, оснащенный системой ФИП (с источником ионов Ga⁺) при ускоряющем напряжении 5 кВ. Использовались массивы точек ФИП-модификации размером 5×5 мкм с расстоянием между наноглублениями 2.0 мкм и количеством проходов пучка (N): от 1 до 60. Экспериментальные исследования проводились на трех образцах, которые были получены в результате ФИП-обработки при различных условиях. Образец 1 не отжигали, с образца 2 начали сгонять окисел в камере SemiTEq STE 35 МЛЭ в потоке мышьяка, образец 3 получили путем сгона окисла с поверхности в камере МЛЭ в отсутствие потока мышьяка. Полученные образцы были исследованы с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) NTegra.

Результаты и обсуждение

По результатам проведенного исследования АСМ-изображения показали, что в области модификации до отжига форма углублений практически не изменяется с изменением N (рис. 1а,г). Глубина постепенно увеличивается от 1,5 нм для $N=1$ до 10,8 нм для $N=60$ (рис. 2а). Латеральный размер увеличивается вплоть до $N=30$, после чего выходит на насыщение (рис. 2б).

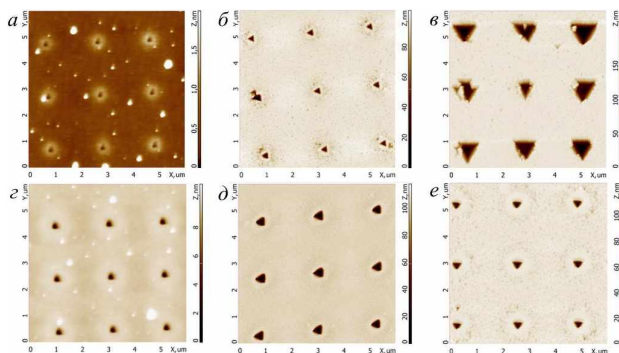


Рис. 1. АСМ-изображения поверхности в области ФНП модификации до отжига при $N=5$ (а), при $N=60$ (б), без потока As при $N=5$ (в), при $N=60$ (д), в потоке As при $N=5$ (е), при $N=60$ (е)

На образцах, которые отжигались в камере МЛЭ обнаружены углубления, имеющие форму треугольной пирамиды. Однако, можно заметить, что для образца 3 размер нанougлублений гораздо больше, чем для образца 2, что особенно заметно при значениях $N=1$ и 5 (рис. 1б,в,д,е). Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что углубления на поверхности, отжигаемой без As, увеличиваются как по глубине, так и по латеральному размеру по сравнению с углублениями на неотожженной поверхности (рис. 2). Средний латеральный размер углублений при $N=60$ равен 0,29 мкм (рис. 2б), в то время как средняя глубина имеет значение 110 нм (рис. 2а).

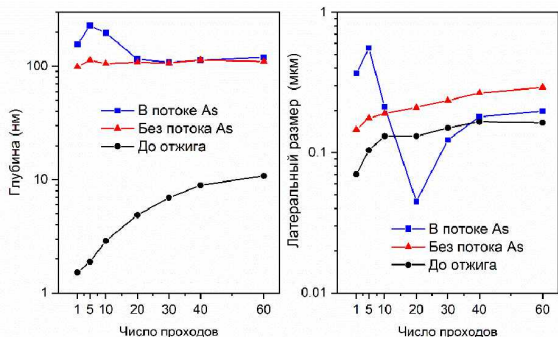


Рис. 2. Графики зависимости глубины и латерального размера от X полученные по результатам АСМ-изображений поверхности в области ФИН модификации до отжига, без потока As (а), в потоке As (б)

Гладкая область вокруг углубления – диск, который образуется в результате перераспределения материала подложки во время обработки ФИП (рис. 1б,с). Так как во время его воздействия из поверхности тяжелыми, ускоренными ионами галлия выбиваются атомы подложки, образуется углубление. Несвязанные частицы разлетаются вокруг области взаимодействия, образуя некий аморфный материал, который легко взаимодействует с окислом. В результате при нагреве после схода окисла наблюдается гладкая кристаллическая структура подложки.

Проведя сравнительный анализ АСМ-изображений участков поверхности за пределами областей модификации (рис. 3), можно сделать вывод, что одни атомы, образующие окисел на поверхности, при нагревании начинают сразу же испаряться с поверхности, другие же взаимодействуют с подложкой GaAs(111), тем самым мышьяк разрывает связи и покидает свое положение переходя в вышележащий слой.

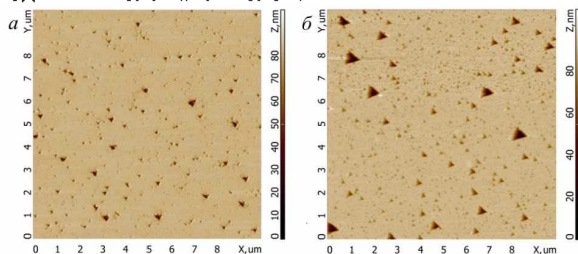


Рис. 3. АСМ-изображения поверхности вне области модификации ФИН для образцов без потока As (а) и в потоке As (б).

Галлий в свою очередь начинает образовывать связи с оставшимся слоем оксида, в итоге образуются некие углубления, после полного схода оксидной пленки (рис. 3). При отжиге подложек в отсутствие потока As средний размер углублений меньше (рис. 3а), чем в случае его присутствия (рис. 3б), что связано с термодинамикой взаимодействия оксидов галлия и мышьяка с поверхностью GaAs и потоком As.

Выводы

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать вывод, что оптимальными режимами формирования симметричных треугольных пирамидальных наноглублений на поверхности предварительно модифицированной ФИП для достижения меньшего латерального размера являются: отжиг в отсутствие потока As при N больше 5 и в потоке при $N=60$, для достижения большего латерального размера следует использовать параметры отжига в потоке As и меньшее значение N , при температуре отжига 730 C°, времени отжига 60 минут.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10313, <https://rscf.ru/project/23-79-10313/>, в Южном федеральном университете.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Valeri M. et al. Generation and characterization of polarization-entangled states using quantum dot single-photon sources // *Quantum Sci. Technol.* 2024. Vol. 9, № 2. P. 025002.
2. da Silva S.F.C. et al. GaAs quantum dots grown by droplet etching epitaxy as quantum light sources // *Applied Physics Letters*. AIP Publishing LLC, 2021. Vol. 119, № 12. P. 120502.
3. Ahmadi A., Fognini A., E. Reimer M. Toward On-Demand Generation of Entangled Photon Pairs with a Quantum Dot // *Recent Advances in Nanophotonics - Fundamentals and Applications*. IntechOpen, 2020.
4. Vajner D.A. et al. On-Demand Generation of Indistinguishable Photons in the Telecom C-Band Using Quantum Dot Devices // *ACS Photonics*. 2024. Vol. 11, № 2. P. 339–347.
5. Zeuner K.D. et al. On-Demand Generation of Entangled Photon Pairs in the Telecom C-Band with InAs Quantum Dots // *ACS Photonics*. 2021. Vol. 8, № 8. P. 2337–2344.
6. von Helversen M. et al. Triggered Single-Photon Emission of Resonantly Excited Quantum Dots Grown on (111)B GaAs Substrate // *Phys. status solidi – Rapid*

Res. Lett. 2022. Vol. 16, № 8.

7. Tuktamyshev A. et al. Telecom-wavelength InAs QDs with low fine structure splitting grown by droplet epitaxy on GaAs(111)A vicinal substrates // Appl. Phys. Lett. 2021. Vol. 118, № 13.
8. Pelucchi E. On the multifaceted journey for the invention of epitaxial quantum dots // Prog. Cryst. Growth Charact. Mater. 2023. Vol. 69, № 2–4. P. 100603.
9. Lozano M.S., Gómez V.J. Epitaxial growth of crystal phase quantum dots in III–V semiconductor nanowires // Nanoscale Adv. 2023. Vol. 5, № 7. P. 1890–1909.
10. Rajkumar K.C. et al. Realization of three-dimensionally confined structures via one-step in situ molecular beam epitaxy on appropriately patterned GaAs(111)B and GaAs(001) // J. Vac. Sci. Technol. B Microelectron. Nanom. Struct. Process. Meas. Phenom. 1994. Vol. 12, № 2. P. 1071–1074.
11. Mano T., Ohtake A., Kuroda T. Lattice-Mismatched Epitaxy of InAs on (111)A-Oriented Substrate: Metamorphic Layer Growth and Self-Assembly of Quantum Dots // Phys. status solidi. 2024.
12. Shen X.Q., Ren H.W., Nishinaga T. Initial growth behaviors of disk-shaped mesas in GaAs molecular beam epitaxy on GaAs(111)B substrates // J. Cryst. Growth. 1997. Vol. 177, № 3–4. P. 175–180.

Лакшина Екатерина Александровна, техник-проектировщик, Россия, город Таганрог, улица Шевченко 2, 347922, телефон: +7 (918) 288-50-27, email: lakhina@sfedu.ru;

Черненко Наталия Евгеньевна, младший научный сотрудник, Россия, город Таганрог, улица Шевченко 2, 347922, телефон: +7 (863) 437-16-11, email: ncherненко@sfedu.ru;

Кириченко Данил Владимирович, лаборант-исследователь, Россия, город Таганрог, улица Шевченко 2, 347922, телефон: +7 (863) 437-16-11, email: dankir@sfedu.ru;

Шандыба Никита Андреевич, младший научный сотрудник, Россия, город Таганрог, улица Шевченко 2, 347922, телефон: +7 (863) 437-16-11, email: shandyba@sfedu.ru;

Балакирев Сергей Вячеславович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Лаборатории эпитаксиальных технологий Южного федерального университета, Россия, город Таганрог, улица Шевченко 2, 347922, телефон: +7 (863) 437-16-11, email: sbalakirev@sfedu.ru;

Солодовник Максим Сергеевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Лаборатории эпитаксиальных технологий Южного федерального университета, Россия, город Таганрог, улица Шевченко 2, 347922, телефон: +7 (863) 437-16-11, email: solodovnikms@sfedu.ru.

Lakhina Ekaterina Alexandrovna, technician designer, 347922, Russia, Taganrog, 2 Shevchenko Street, phone: +7 (918) 288-50-27, email: lakhina@sfedu.ru;

Chernenko Natalia Evgenyevna, junior research assistant, 347922, Russia, Taganrog, 2 Shevchenko Street, phone: +7 (863) 437-16-11, email: nchernenko@sfedu.ru;

Kirichenko Danil Vladimirovich, laboratory researcher, 347922, Russia, Taganrog, 2 Shevchenko Street, phone: +7 (863) 437-16-11, email: dankir@sfedu.ru;

Shandyba Nikita Andreyevich, junior research assistant, 347922, Russia, Taganrog, 2 Shevchenko Street, phone: +7 (863) 437-16-11, email: shandyba@sfedu.ru;

Balakirev Sergey Vyacheslavovich, candidate of technical sciences, leading researcher, 347922, Russia, Taganrog, 2 Shevchenko Street, phone: +7 (863) 437-16-11, email: sbalakirev@sfedu.ru;

Solodovnik Maxim Sergeevich, candidate of technical sciences, leading researcher, 347922, Russia, Taganrog, 2 Shevchenko Street, phone: +7 (863) 437-16-11, email: solodovnikms@sfedu.ru.