

08.2

Формирование островков и нитевидных нанокристаллов на коротких затравках InAs при эпитаксиальном росте $\text{InAs}_{1-x}\text{N}_x$ на кремнии

© А.К. Кавеев¹, Д.В. Минив², В.В. Федоров²¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия² Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет им. Ж.И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: kaveev@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 4 апреля 2024 г.

В окончательной редакции 26 апреля 2024 г.

Принято к публикации 7 мая 2024 г.

Показана возможность формирования на поверхности Si(111), покрытой нарушенным оксидом кремния, нитевидных нанокристаллов $\text{InAs}_{1-x}\text{N}_x$ на коротких затравках InAs. Также обнаружено формирование паразитного островкового слоя. Выявлено, что в первом случае формируется преимущественно структурная фаза вюрцита, а во втором случае — структурная фаза сфалерита.

Ключевые слова: $\text{InAs}_{1-x}\text{N}_x$, разбавленный нитрид, нитевидные нанокристаллы, молекулярно-лучевая эпитаксия.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.17.58572.19941

Нитевидные нанокристаллы (ННК, NW) на основе InAs являются привлекательным материалом с точки зрения применимости в области инфракрасной фотоники и фотодетектирования [1,2]. Существенная величина соотношения поверхность/объем позволяет эпитаксиально выращивать материалы с заметным рассогласованием параметров решеток, в частности обеспечивать рост материалов группы A_3B_5 на кремнии [3]. Применение ННК в области инфракрасного фотодетектирования позволяет уменьшить объем активной области детектора и соответственно уменьшить величину темнового тока [4,5]. Самоиндуцированные ННК InAs имеют тенденцию кристаллизоваться в метастабильной структуре вюрцита (WZ) с большей шириной запрещенной зоны, чем в случае структуры цинковой обманки (ZB), стабильной в объемных кристаллах InAs [6]. Увеличение диапазона фотоотклика ННК-фотодетекторов на основе InAs возможно путем внедрения сурьмы [7] или азота [8,9]. Стабилизация разбавленных твердых растворов $\text{InAs}_{1-x}\text{N}_x$ в целом затруднена из-за фазовой сегрегации и конкурентного внедрения атомов V группы [10]. Решением данной проблемы может служить создание ННК $\text{InAs}_{1-x}\text{N}_x$ ввиду меньшего количества упругих напряжений в ННК за счет более выгодного соотношения поверхность/объем, т.е. более развитой величины гетероинтерфейса, что приводит к более выраженному эффекту эпитаксиальной стабилизации твердых растворов. Эпитаксиальная стабилизация $\text{InAs}_{1-x}\text{N}_x$ была продемонстрирована в планарных гетероструктурах [11,12].

В настоящей работе показана возможность формирования наноструктур $\text{InAs}_{1-x}\text{N}_x$ различной морфологии на подложках $\text{SiO}_x/\text{Si}(111)$. Это островки, а также ННК $\text{InAs}_{1-x}\text{N}_x$, выращенные по самоиндуцированному механизму. Использовалась система молекулярно-лучевой

эпитаксии Veeco GEN III, оснащенная эффузионной ячейкой In, крекерным источником As, а также источником индуктивно связанной плазмы азота. Поток азота составлял 0.9 ml/min при мощности источника 350 W. Формирование оксида кремния на подложках Si осуществлялось модифицированным методом Ширази [13]. Для облегчения зародышеобразования подложки подвергались термическому отжигу в условиях сверхвысокого вакуума с целью образования точечных дефектов в слое оксида кремния [14], т.е. его частичного нарушения. Кристаллическая структура образцов исследовалась методом рентгеновского дифракционного анализа (РДА). При этом производилось построение карт обратного пространства, полученных путем трехмерной сборки отдельных изображений, соответствующих конкретному азимутальному углу установки образца.

ННК $\text{InAs}_{1-x}\text{N}_x$ были получены путем формирования на коротких затравках InAs при температуре роста 460°C и соотношении эквивалентных давлений в потоках As_4/In , равном 90. Соотношение времени роста $\text{InAs}_{1-x}\text{N}_x$ и затравки InAs составляло 4.5. На рис. 1, а представлено полученное методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) изображение в боковой проекции массива коротких затравок InAs, образующихся в местах термического разрушения оксида кремния. При отсутствии затравочных ННК InAs непосредственный рост $\text{InAs}_{1-x}\text{N}_x$ приводил к доминированию роста трехмерных островков над ростом ННК (рис. 1, б). Поверхностная плотность ННК $\text{InAs}_{1-x}\text{N}_x$ при этом была крайне незначительной ($< 0.5 \mu\text{m}^{-2}$), как и средняя высота ННК ($< 400 \text{ nm}$). Островки $\text{InAs}_{1-x}\text{N}_x$ образовывались непосредственно на слое оксида кремния, что можно объяснить увеличением вероятности зарождения $\text{InAs}_{1-x}\text{N}_x$ в присутствии активных форм азота [15].

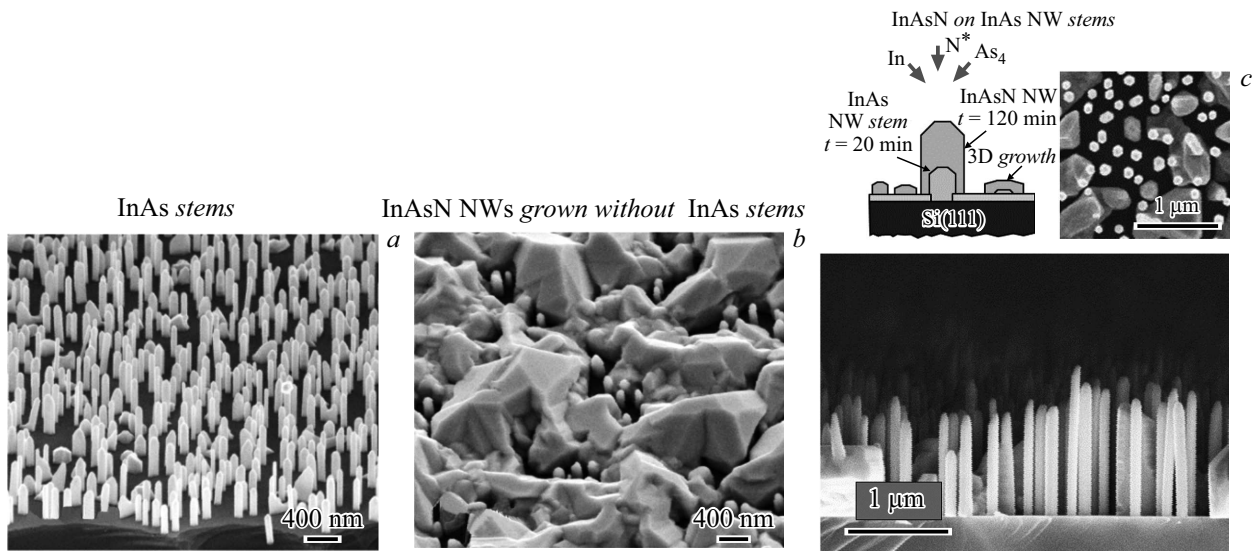


Рис. 1. *a* — СЭМ-изображение в боковой проекции зародышей InAs; *b* — СЭМ-изображение массива ННК $\text{InAs}_{1-x}\text{N}_x$, выращенного без использования зародышей InAs непосредственно на отожженной поверхности $\text{SiO}_x/\text{Si}(111)$; *c* — СЭМ-изображения в боковой и вертикальной (правая вставка) проекциях ННК $\text{InAs}_{1-x}\text{N}_x$, выращенных на коротких затравках InAs. На левой вставке — схематическое изображение полученных объектов.

Достичь значимого количества ННК $\text{InAs}_{1-x}\text{N}_x$ без использования хотя бы коротких затравок ННК InAs не удалось, тогда как использование коротких затравок приводит к возможности формирования более длинных ННК. На рис. 1, *c* представлен результат роста $\text{InAs}_{1-x}\text{N}_x$ на коротких затравках InAs (на вставках приведены вид сверху и схематическое изображение ННК). Средняя высота и диаметр ННК $\text{InAs}_{1-x}\text{N}_x$ составляют $1.2 \pm 0.3 \mu\text{m}$ и $110 \pm 30 \text{nm}$ соответственно. Для сравнения в случае коротких затравок InAs эти величины равны $0.5 \pm 0.2 \mu\text{m}$ и $90 \pm 50 \text{nm}$. Как видно из СЭМ-изображения (вид сверху), представленного на правой вставке к рис. 1, *c*, рост ННК $\text{InAs}_{1-x}\text{N}_x$ на коротких затравках InAs также сопровождается паразитным ростом трехмерных островков. Если же использовать ненарушенный оксид кремния, островковый слой переходит в сплошной, полностью покрывая поверхность оксида.

Измерения методом РДА и анализ картин обратного пространства показали, что ННК $\text{InAs}_{1-x}\text{N}_x$ образуют кристаллическую фазу типа вюрцита, аналогичную таковой для ННК InAs. Эти измерения находятся в соответствии с картинками дифракции быстрых электронов (ДБЭ) (рис. 2, *a*), также характерными для фазы вюрцита ННК InAs в направлении электронного пучка $[11\bar{2}0]$ (см. работу [16]). Были выявлены эпитаксиальные соотношения выращенных массивов ННК: направление роста ННК $[0001]$ ориентировано вдоль направления $[111]$ Si, в то время как в плоскости подложки направление $[11\bar{2}0]$ решетки вюрцита InAs ориентировано вдоль направления $[1\bar{1}0]$ решетки Si. На рис. 2, *b* показан фрагмент зоны Лауэ $\langle 1\bar{1}20 \rangle$ нулевого порядка, полученный для образца ННК $\text{InAs}_{1-x}\text{N}_x$. Рефлексы, связанные с фазой

сфалерита, выражены слабо. В правой части рисунка приведена картина просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) ННК в высоком разрешении. На картине верхней стрелкой указан участок бездефектной структуры вюрцита, нижней стрелкой — пример фазового сбоя упаковки. В целом данная картина подтверждает формирование фазы вюрцита в ННК.

Для оценки структурных свойств паразитных трехмерных островков был исследован образец, не содержащий ННК. Островковый слой имеет неупорядоченную структуру типа сфалерита, характерную для объемных кристаллов InAs. На рентгенограммах различается единственный набор сплошных дифракционных колец. Типичное двумерное поперечное сечение, показывающее фрагмент зоны Лауэ кремния $\langle 1\bar{1}0 \rangle$ нулевого порядка, представлено на рис. 3. Наблюдаемые дифракционные кольца можно отнести к кубической кристаллической структуре сфалерита. Никаких дополнительных дифракционных колец, специфичных для структуры вюрцита, характерной для ННК InAs, обнаружено не было. Эти дополнительные кольца должны были бы соответствовать дифракции на кристаллографических плоскостях $\{1\bar{1}0l\}$ и $\{2\bar{2}0l\}$.

Оценка концентрации азота осуществлялась методом вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС). Примерное количество азота было оценено как 0.5 at.%. Таким образом, продемонстрирована возможность как островкового роста фазы сфалерита $\text{InAs}_{1-x}\text{N}_x$, так и роста фазы вюрцита ННК $\text{InAs}_{1-x}\text{N}_x$. Последняя формировалась в случае использования короткой затравки InAs. Предлагаемые массивы ННК $\text{InAs}_{1-x}\text{N}_x$ являются перспективным материалом для создания фотоприем-

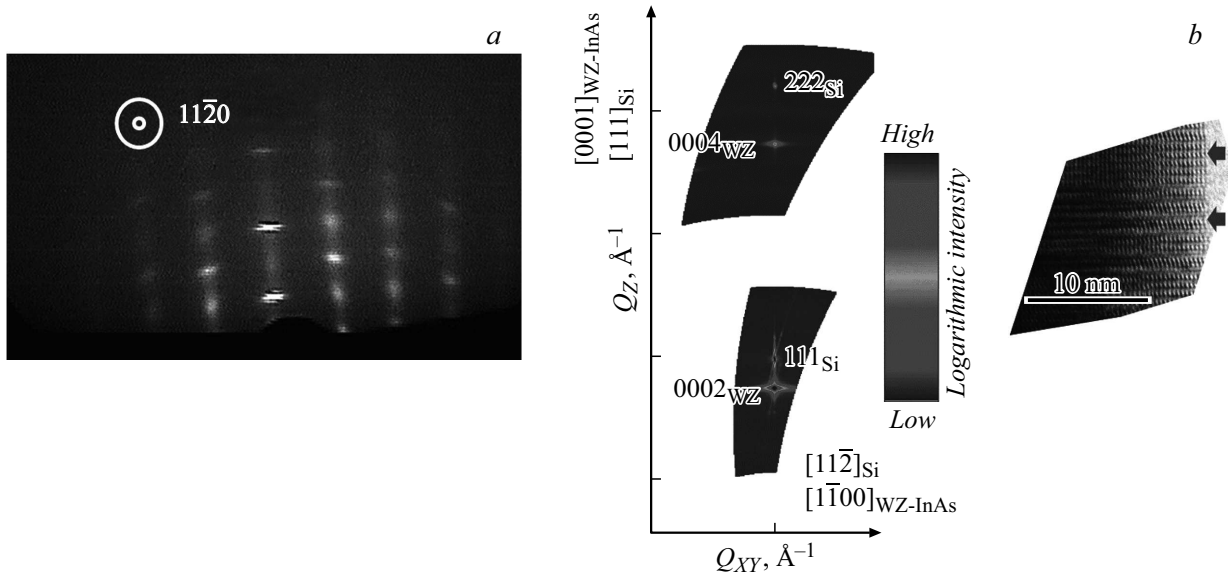


Рис. 2. *a* — характерная картина ДБЭ для НК InAs_{1-x}N_x. *b* — фрагмент зоны Лауэ $\langle 1\bar{1}20 \rangle$ нулевого порядка для НК InAs_{1-x}N_x. Отмечены положения брэгговских рефлексов для фазы вюрцита InAs_{1-x}N_x и для кремния. В правой части показана картина ПЭМ, верхней стрелкой указан участок бездефектной структуры вюрцита, нижней стрелкой — фазовый сбой упаковки.

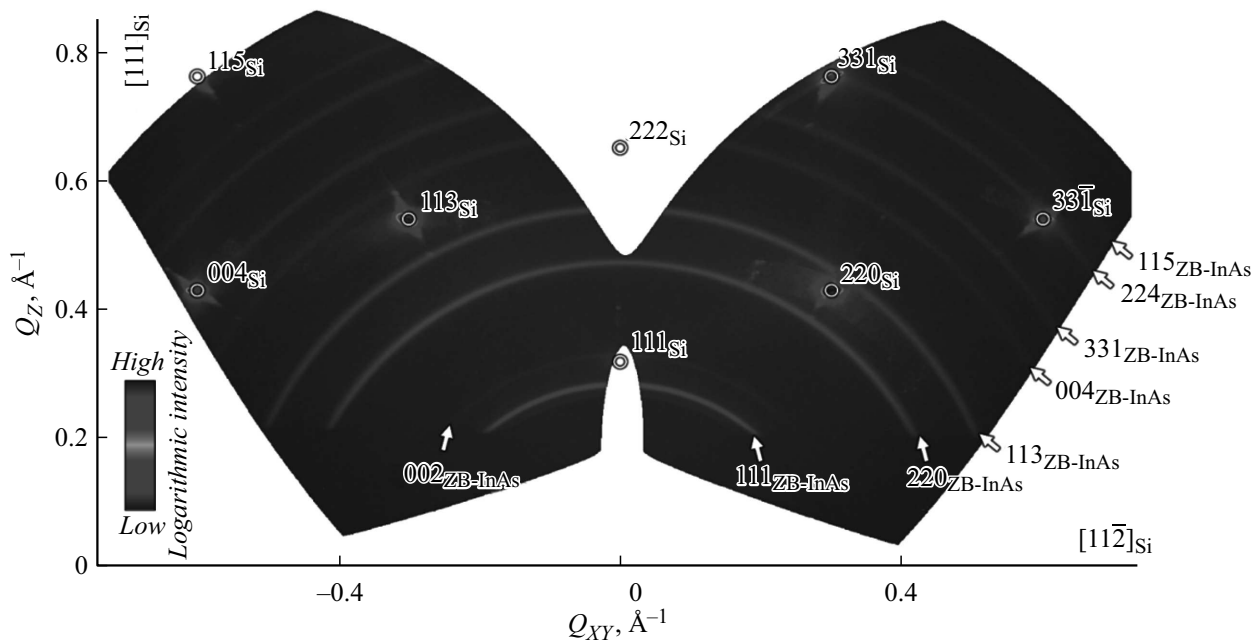


Рис. 3. Фрагмент зоны Лауэ кремния $\langle 1\bar{1}0 \rangle$ нулевого порядка. Модельные положения брэгговских рефлексов Si отмечены кружками. Стрелками указаны положения дифракционных колец, соответствующих поликристаллической фазе сфалерита InAs.

ников и светоизлучающих устройств, работающих в ближнем и среднем ИК-диапазоне.

Благодарности

Авторы благодарят коллег из Лаборатории возобновляемых источников энергии СПбАУ им. Ж.И. Алфёрова РАН за помощь в проведении экспериментов. Авторы признательны С.М. Сутуруину за предоставление ПО ResSpaceQT для анализа данных РДА. Авторы благо-

дарны Б.Я. Беру за проведение измерений ВИМС, а также Д.А. Кириленко за проведение измерений методом ПЭМ, которые выполнены с использованием оборудования федерального ЦКП „Материаловедение и диагностика в передовых технологиях“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A. Abrand, M.A. Baboli, A. Fedorenko, S.J. Polly, E. Manfreda-Schulz, S.M. Hubbard, P.K. Mohseni, *ACS Appl. Nano Mater.*, **5**, 840 (2022). DOI: 10.1021/acsnm.1c03557
- [2] X. Zhang, H. Huang, X. Yao, Z. Li, C. Zhou, X. Zhang, P. Chen, L. Fu, X. Zhou, J. Wang, W. Hu, W. Lu, J. Zou, H.H. Tan, C. Jagadish, *ACS Nano*, **13**, 3492 (2019). DOI: 10.1021/acsnano.8b09649
- [3] W.G. Schmidt, *Appl. Phys. A*, **75**, 89 (2002). DOI: 10.1007/s003390101058
- [4] R.C. Jones, in *Advances in electronics and electron physics*, ed. by L. Marton (Academic Press, 1953), vol. 5, p. 1–96. DOI: 10.1016/S0065-2539(08)60683-6
- [5] Z. Li, J. Allen, M. Allen, H.H. Tan, C. Jagadish, L. Fu, *Materials*, **13**, 1400 (2020). DOI: 10.3390/ma13061400
- [6] S. Pournia, S. Linser, G. Jnawali, H.E. Jackson, L.M. Smith, A. Ameruddin, P. Caroff, J. Wong-Leung, H.H. Tan, C. Jagadish, H.J. Joyce, *Nano Res.*, **13**, 1586 (2020). DOI: 10.1007/s12274-020-2774-0
- [7] T. Xu, H. Wang, X. Chen, M. Luo, L. Zhang, Y. Wang, F. Chen, C. Shan, C. Yu, *Nanotechnology*, **31**, 294004 (2020). DOI: 10.1088/1361-6528/ab8591
- [8] A. Krier, M. de la Mare, P.J. Carrington, M. Thompson, Q. Zhuang, A. Patané, R. Kudrawiec, *Semicond. Sci. Technol.*, **27**, 094009 (2012). DOI: 10.1088/0268-1242/27/9/094009
- [9] H. Naoi, Y. Naoi, S. Sakai, *Solid-State Electron.*, **41**, 319 (1997). DOI: S0038-1101(96)00236-5
- [10] W. Walukiewicz, J.M.O. Zide, *J. Appl. Phys.*, **127**, 010401 (2020). DOI: 10.1063/1.5142248
- [11] Q. Zhuang, A.M.R. Godenir, A. Krier, K.T. Lai, S.K. Haywood, *J. Appl. Phys.*, **103**, 063520 (2008). DOI: 10.1063/1.2896638
- [12] J. Ibanez, R. Oliva, M. De la Mare, M. Schmidbauer, S. Hernandez, P. Pellegrino, D.J. Scurr, R. Cusco, L. Artus, M. Shafi, R.H. Mari, M. Henini, Q. Zhuang, A. Godenir, A.J. Krier, *Appl. Phys.*, **108**, 103504 (2010). DOI: 10.1063/1.3509149
- [13] W.J. Kern, *Electrochem. Soc.*, **137**, 1887 (1990). DOI: 10.1149/1.2086825
- [14] G. Koblmuller, S. Hertenberger, K. Vizbaras, M. Bichler, F. Bao, J.-P. Zhang, G. Abstreiter, *Nanotechnology*, **21**, 365602 (2010). DOI: 10.1088/0957-4484/21/36/365602
- [15] M. Gruart, G. Jacopin, B. Daudin, *Nano Lett.*, **19**, 4250 (2019). DOI: 10.1021/acs.nanolett.9b00023
- [16] J. Jo, Y. Tchoe, G.-C. Yi, M. Kim, *Sci. Rep.*, **8**, 1694 (2018). DOI: 10.1038/s41598-018-19857-2