

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-06-99-107

УДК 539.27

Влияние смены механизма роста на синтез двумерных слоёв и квантовых точек германия на кремнии

Олжас Игоревич Кукенов¹, Владимир Владиславович Дирко²,
Арсений Сергеевич Соколов³, Кирилл Александрович Лозовой⁴✉,
Кристина Игоревна Швалева⁵, Андрей Павлович Коханенко⁶,
Александр Васильевич Войцеховский⁷

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

¹okukenov@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-8189-3749>

²vovenmir@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0008-8052-3253>

³ars856570@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0007-7811-0946>

⁴lozovoymailbox@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4029-8353>

⁵homiackowa.kristina@yandex.ru

<https://orcid.org/0009-0000-2898-4513>

⁶kokh@mail.tsu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7091-3011>

⁷vav43@mail.tsu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1196-6199>

Аннотация

Предмет исследования. В работе изучалось формирование квантовых точек германия на подложке кремния с кристаллографической ориентацией (100) при разных режимах роста. **Цель работы.** Экспериментальное исследование влияния механизмов роста на формирование германиевых слоёв и квантовых точек на подложке кремния с ориентацией (100) для получения оптических элементов на основе кремний-германиевых наноструктур. **Методы.** После предэпитаксиальной очистки кремниевой подложки синтез германия на Si(100) производится методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Анализ морфологии поверхности проводится методом дифракции быстрых отражённых электронов во время синтеза и методом сканирующей электронной микроскопии после напыления. **Основные результаты.** В работе определены диапазоны температур, при которых рост Si на Si(100) происходит за счёт формирования островков, за счёт движения ступеней и комбинированно. Показано влияние смены механизмов роста на размеры и плотность квантовых точек Ge на Si(100). **Практическая значимость.** Результаты исследований дают представление о влиянии механизмов роста на размеры формируемых квантовых точек германия на кремнии, что позволит создавать элементы нанофотоники и наноэлектроники со строго заданными параметрами.

Ключевые слова: квантовые точки, двумерные слои, молекулярно-лучевая эпитаксия, дифракция быстрых отражённых электронов, германий, кремний

Благодарность: исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-62-10021, <https://rscf.ru/project/23-62-10021/>.

Ссылка для цитирования: Кукенов О.И., Дирко В.В., Соколов А.С., Лозовой К.А., Швалева К.И., Коханенко А.П., Войцеховский А.В. Влияние смены механизма роста на синтез двумерных слоёв и квантовых точек германия на кремнии // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 6. С. 99–107. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-06-99-107>

Коды OCIS: 230.5590, 250.0040, 180.5810.

Effect of changing the growth mechanism on the synthesis of germanium two-dimensional layers and quantum dots on silicon

OLZHAS I. KUKENOV¹, VLADIMIR V. DIRKO², ARSENIY S. SOKOLOV³, KIRILL A. LOZOVY⁴✉, KRISTINA I. SHVALEVA⁵, ANDREY P. KOKHANENKO⁶, ALEXANDER V. VOITSEKHOVSKII⁷

National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

¹okukenov@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-8189-3749>

²vovenmir@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0008-8052-3253>

³ars856570@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0007-7811-0946>

⁴lozovoymailbox@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4029-8353>

⁵homiackowa.kristina@yandex.ru

<https://orcid.org/0009-0000-2898-4513>

⁶kokh@mail.tsu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7091-3011>

⁷vav43@mail.tsu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1196-6199>

Abstract

Subject of study. The work studied the formation of germanium quantum dots on a silicon with (100) crystallographic orientation under different growth regimes. **Aim of study.** The work is devoted to conducting experimental studies of the influence of growth mechanisms on the formation of germanium layers and quantum dots on a silicon (100) substrate for the production of optical elements based on silicon-germanium nanostructures. **Methods.** After cleaning the Si substrate pre-epitaxially, germanium is synthesized on Si(100) through molecular beam epitaxy. The surface morphology is analyzed using reflection high-energy electron diffraction during synthesis and scanning electron microscopy after deposition. **Main results.** The work determines the temperature ranges at which the Si/Si(100) growth occurs due to the nucleation of islands, due to the movement of steps, and in combination. The effect of changing growth mechanisms on the size and density of Ge quantum dots on Si(100) is shown. **Practical significance.** The research results provide insight into the influence of growth mechanisms on the sizes of formed germanium quantum dots on silicon, which will make it possible to create nanophotonics and nanoelectronics elements with strictly specified parameters.

Keywords: quantum dots, 2D layers, molecular beam epitaxy, reflection high-energy electron diffraction, germanium, silicon

Acknowledgment: this work was supported by the Russian Science Foundation Grant № 23-62-10021, <https://rscf.ru/project/23-62-10021/>.

For citation: Kukenov O.I., Dirko V.V., Sokolov A.S., Lozovoy K.A., Shvaleva O.I., Kokhanenko A.P., Voitsekhovskii A.V. Effect of changing the growth mechanism on the synthesis of germanium two-dimensional layers and quantum dots on silicon [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2024. V. 91. № 6. P. 99–107. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-05-99-107>

OCIS codes: 230.5590, 250.0040, 180.5810.

ВВЕДЕНИЕ

Кремниевая электронная промышленность остаётся наиболее развитой среди производства других полупроводников. Поскольку кремний является наиболее распространённым полупроводником в мире, ему уделяют особое внимание. Структуры на основе кремния доминируют в электронике, оптоэлектронике и солнечной энергетике [1]. В последней области особенно важна высокая чувствительность детекторов в широком спектре длин волн [2]. Поэтому здесь

широкое применение нашло использование гетероструктур на основе кремния и германия. Германиевые двумерные слои и квантовые точки расширяют спектр поглощения кремниевых солнечных элементов в инфракрасную область, что повышает их эффективность, сохраняя невысокую стоимость материалов.

Наиболее чистые эпитаксиальные структуры с минимальным количеством дефектов получают при молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) [3]. Создание наноструктур высо-

кого качества невозможно без точного метода контроля поверхности. Метод дифракции быстрых отражённых электронов (ДБОЭ), реализованный в методе МЛЭ, зарекомендовал себя как универсальное средство контроля морфологии поверхности при выращивании полупроводниковых наноструктур *in situ* [4, 5].

Большое количество экспериментальных исследований эпитаксиального роста германия на кремнии показывают, что при некоторых условиях в этой системе возможно образование островков различной формы: с квадратным и прямоугольным основанием [6]. Подходящие ростовые условия также могут способствовать формированию нитевидных квантовых точек с очень высоким значением отношения длины к ширине основания [7].

Для монохроматических фотодетекторов необходимо создавать гетероструктуры с узким распределением наностроек по размеру. На однородность квантовых точек Ge на Si(100) влияют такие ростовые параметры как температура синтеза, скорость роста, количество осаждённого германия, а также отжиг структуры после её создания. Требуемое распределение наностроек по размерам можно получить, тщательно подбирая и постоянно контролируя ростовые условия.

Помимо плотности и однородности квантовых точек оптоэлектронные характеристики таких наноструктур зависят от размера и формы квантовых точек. Эти параметры определяют длины волн оптического излучения, которые может зарегистрировать детектор. Следовательно, использование гетероструктур с широким распределением квантовых точек по размеру позволит поглощать более широкий спектр длин волн, что весьма полезно для солнечной энергетики [8].

Цель работы — экспериментальное исследование влияния механизмов роста на формирование германиевых слоёв и квантовых точек на подложке кремния с ориентацией (100) для получения оптических элементов на основе кремний-германиевых наноструктур. В работе при анализе процессов роста Si на Si(100) методом дифракции быстрых отражённых электронов в широком диапазоне температур определены доминирующие при данной температуре механизмы роста двумерных слоёв. Затем исследованы образцы с двумерными слоями и наностройками Ge на Si(100),

выращенными при температурах 470–600 °С. Показано, что при небольшом изменении температуры роста вблизи температуры смены механизмов роста образцы значительно различаются поверхностной плотностью квантовых точек и размерами наностроек.

1. МЕХАНИЗМЫ РОСТА ПРИ ЭПИТАКСИАЛЬНОМ СИНТЕЗЕ Si НА Si(100)

1.1. Материалы и методы

Эксперименты проводились на установке МЛЭ «Катунь–100» (производства ИФП СО РАН, Новосибирск). Гетероэпитаксиальный синтез двумерных слоёв и квантовых точек германия производился после предэпитаксиальной очистки подложки Si(100) и нанесения буферного слоя толщиной более 50 нм. Помимо температуры и скорости роста, формирование квантовых точек зависит от состояния поверхности, на которой происходит рост. Предэпитаксиальная очистка поверхности и нанесение буферного слоя позволяют получить бездефектную атомарно-гладкую поверхность. Тем не менее, за счёт отклонения подложки от основного кристаллографического направления (менее $0,1^\circ$), поверхность представляет собой набор ступеней и террас. При синтезе Ge на Si(100) ширина террас оказывает большое влияние на зарождение квантовых точек на них.

Поверхность Si(100) имеет чередующиеся террасы двух видов: террасы типа А со сверхструктурой 1×2 и параллельной ориентацией димерных рядов относительно края террасы (ступени) и террасы типа В со сверхструктурой 2×1 , ориентация димерных рядов которой располагается перпендикулярно ступени [9–11]. Гомоэпитаксиальный рост Si на Si(100) приводит к тому, что каждый последующий слой на террасе превращает её в террасу противоположного типа. При определённых температуре и скорости роста, ступени могут сдвигаться, при этом ширина террас одного типа значительно превосходит ширину террас другого типа.

С целью определения морфологии поверхности (отношения ширины террас двух типов) при разных температурах были проведены эксперименты по синтезу Si на Si(100). Синтез Si на Si(100) проводился после высоковаку-

умного отжига подложки Si(100) со скоростью роста кремния 0,1 монослой (МС) в секунду при различных температурах.

1.2. Результаты и обсуждение

При анализе поверхности в процессе роста методом ДБЭО в направлении [110] наблюдается бимодальный характер колебаний интенсивности (рис. 1). Он заключается в том, что имеются два чередующихся максимума разной интенсивности, каждый из которых соответствует своему периоду колебаний.

Формирование террас типа В сопровождается большим максимумом интенсивности вблизи центрального рефлекса, а рост А-террас — меньшим максимумом [9, 12–14].

В ходе исследования гомоэпитаксиального роста Si на Si(100) в направлении [110] методом ДБЭО была получена зависимость отношения периодов колебаний при температурах роста до 550 °С (рис. 2).

При низких температурах (200–500 °С) в направлении [110] изучались колебания интенсивности во времени. Отношение периодов колебаний, соответствующих сверхструктурам 2×1 и 1×2, незначительно отличается от 1 и составляет в среднем 1,05. Это означает, что формирование одной ступени занимает на 5% больше времени, чем формирование другой.

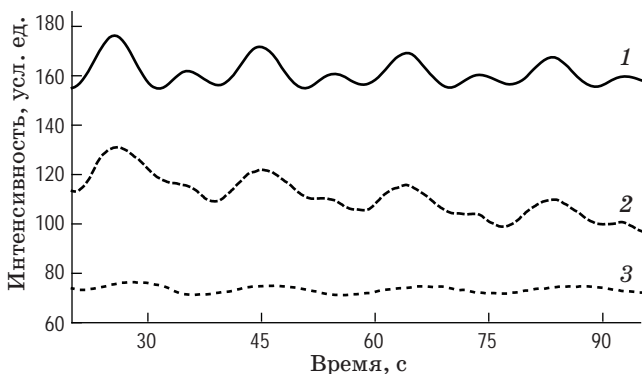


Рис. 1. Зависимости интенсивности дифракционного рефлекса 00 от времени при росте Si на Si(100) при различных температурах роста. Кривая 1 — 450 °С, кривая 2 — 530 °С, кривая 3 — 600 °С. Электронный пучок ориентирован в направлении [110]

Fig. 1. Dependence of the intensity of the diffraction rod 00 on time during the growth of Si on Si(100) at different growth temperatures. Curve 1 — 450 °С, curve 2 — 530 °С, curve 3 — 600 °С. The electron beam is oriented in the [110] direction

Следовательно, при постоянной скорости роста (0,1 МС/с) отношение времени образования ступеней будет равно отношению площадей ступеней [15]. Поскольку отношение площадей ступеней близко к 1, скорость сближения ступеней в этом диапазоне температур минимальна. Отсюда, механизм роста за счёт смещения ступеней практически не проявляется, а террасы зарастают за счёт образования двумерных островков, и, как следствие, меняется шероховатость. При попадании атома на поверхность его длины пути не всегда хватает, чтобы достичь края террасы, и чаще всего адатомы встречаются друг с другом и образуют двумерные островки [9].

Исходя из того, что при температурах 500–560 °С происходит увеличение отношения периодов T_{\max}/T_{\min} с ростом температуры, ступени сближаются. Механизм роста слоёв становится не только островковым, но происходит ещё и за счёт сдвига ступеней. Часть адатомов достигает края террасы и встраивается в ступеньку, а другая часть адатомов формирует 2D островки.

При температурах 560–600 °С бимодальный характер осцилляций, полученный методом ДБЭО в направлении [110], не наблюдается, он переходит в осцилляции с удвоенным периодом (рис. 1, кривая 3). На одном типе террас рост происходит за счёт образования 2D островков, на другом — за счёт смещения ступеней.

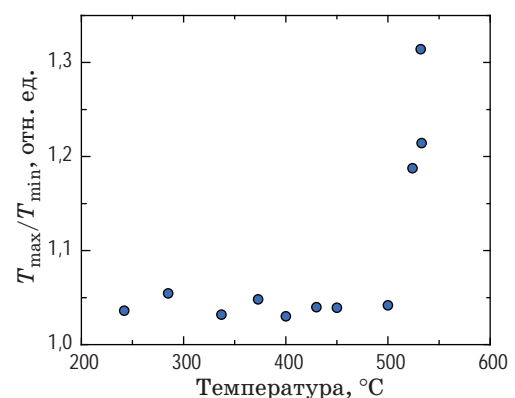


Рис. 2. Температурная зависимость отношений периодов колебаний в направлении [110], соответствующих образованию ступенек разного типа

Fig. 2. Temperature dependence of the ratio of oscillation periods in the [110] direction, corresponding to the formation of steps of different types

При температурах 600–850 °С осцилляции не наблюдаются, поскольку все адатомы достигают края террас и шероховатость минимальна.

Таким образом был определён доминирующий механизм роста ступеней при заданной температуре. Была выявлена критическая точка – 550 °С, при которой моноатомные ступени разных типов максимально сближены. Основываясь на этих выводах, для получения квантовых точек были выбраны температуры вблизи 550 °С.

2. ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЗМОВ РОСТА НА ФОРМИРОВАНИЕ Ge ДВУМЕРНЫХ СЛОЁВ И КВАНТОВЫХ ТОЧЕК НА Si(100)

2.1. Материалы и методы

После оценки морфологии поверхности в процессе роста Si на Si(100) при различных температурах были исследованы процессы роста Ge на Si(100) при тех же температурах. Поскольку рассогласование постоянных решёток для этих материалов составляет около 4,2%, эпитаксиальный рост Ge на Si(100) происходит по механизму Странского–Крастанова. В этом случае 3D островки начинают зарождаться после формирования смачивающего 2D слоя (толщиной около 4 МС). Переход от 2D к 3D росту определяют по росту интенсивности вблизи рефлекса 01 на картине дифракции (рис. 3).

После замедления роста интенсивности рефлекса 01 эксперимент останавливался. Напыление прекращалось до начала формирования

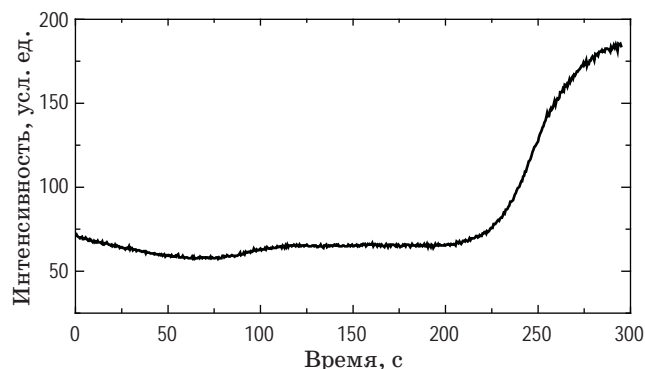


Рис. 3. Изменение интенсивности рефлекса 01 во времени в течение всего эксперимента

Fig. 3. Change in intensity of diffraction rod 01 over time throughout the experiment

куполообразных кластеров. Из анализа зависимости ширины террас от температуры, показанной на рис. 2, для анализа влияния механизмов роста на формирование квантовых точек был выбран интервал температур 470–600 °С. Морфология поверхности контролировалась методом ДБОЭ в течение всего процесса синтеза квантовых точек. Для оценки плотности и размеров квантовых точек полученные образцы были исследованы с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ).

2.2. Результаты и обсуждение

Гетероструктуры с квантовыми точками были получены при трёх различных режимах формирования террас: островковый (470 °С — образец 1); островковый и за счёт сдвига ступеней (550 °С — образец 2); за счёт сдвига ступеней (600 °С — образец 3). Сравнение СЭМ-изображений образцов 1, 2 и 3 приведено на рис. 4.

Как можно заметить по рис. 4, образец 3 отличается от образцов 1 и 2 большим средним расстоянием между квантовыми точками.

Для сравнения площади основания нанокластеров на разных образцах были построены функции распределения островков по размерам (рис. 5–7). Поскольку количество точек для всех образцов разное, их величина нормировалась на единицу.

По рис. 5 можно отметить, что большее количество квантовых точек, выращенных при температуре 470 °С, имеют площадь около 350 нм². А весь набор площадей оснований лежит в диапазоне от 100 до 1100 нм². Плотность квантовых точек составила величину порядка 10¹¹ см⁻², что близко к теоретическому пределу для островков таких размеров.

На рис. 6 видно, что большая часть квантовых точек, полученных при 550 °С, имеет площадь около 300 нм². Нанокластеров размерами более 1000 нм² не наблюдалось. Плотность квантовых точек оставалась высокой и составила около 7×10¹⁰ см⁻².

Судя по распределению на рис. 7, образец 3 имеет квантовые точки, размеры которых простираются на больший диапазон значений по сравнению с квантовыми точками образцов 1 и 2. Плотность квантовых точек была невелика (порядка 10⁹ см⁻²).

Максимум количества квантовых точек смещается в сторону больших размеров с увели-

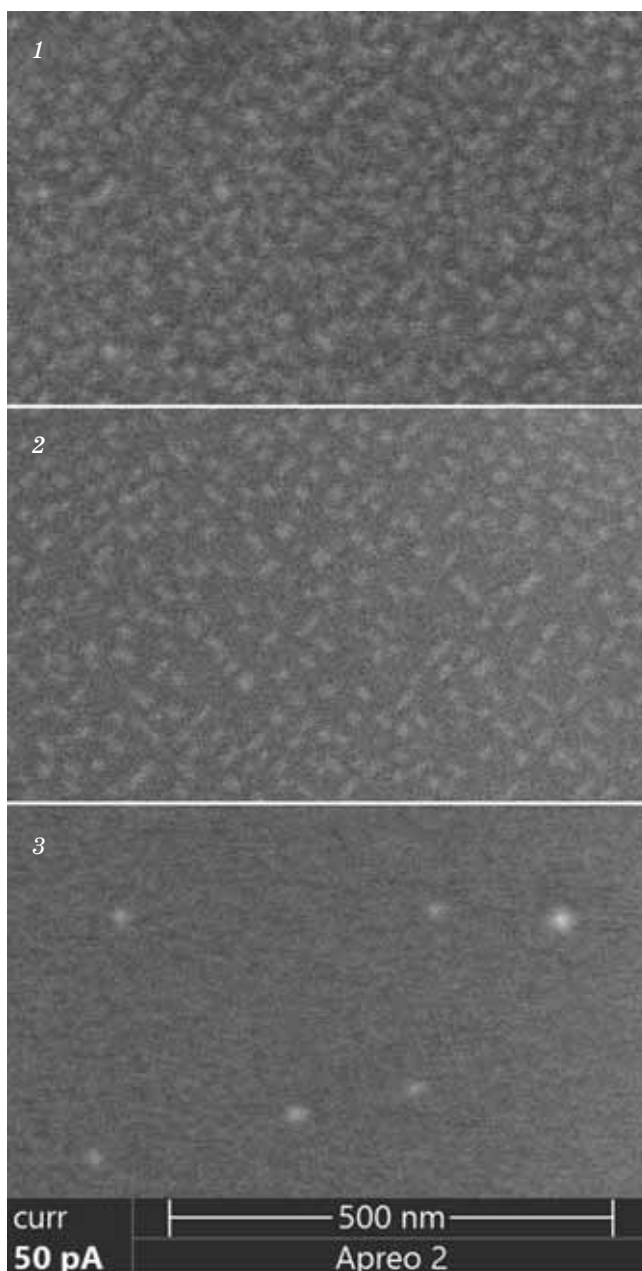


Рис. 4. СЭМ-изображения образцов с квантовыми точками, полученными при 470 °С (1), 550 °С (2), 600 °С (3)

Fig. 4. SEM images of samples with quantum dots obtained at 470 °C (1), 550 °C (2), 600 °C (3)

чением температуры их роста. Причём квантовые точки, сформированные при разных температурах, значительно отличаются по среднему размеру, форме и распределению по размерам.

Результаты экспериментов показали, что даже небольшое изменение температуры синтеза вблизи 550 °С существенно влияет на плотность

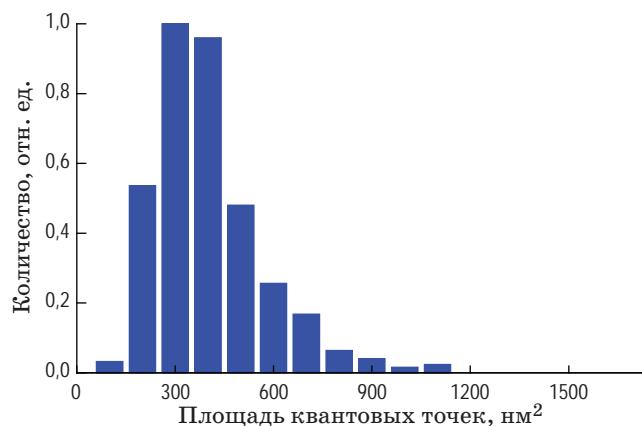


Рис. 5. Распределение по размеру квантовых точек, полученных при температуре 470 °С

Fig. 5. Size distribution of quantum dots obtained at a temperature of 470 °C

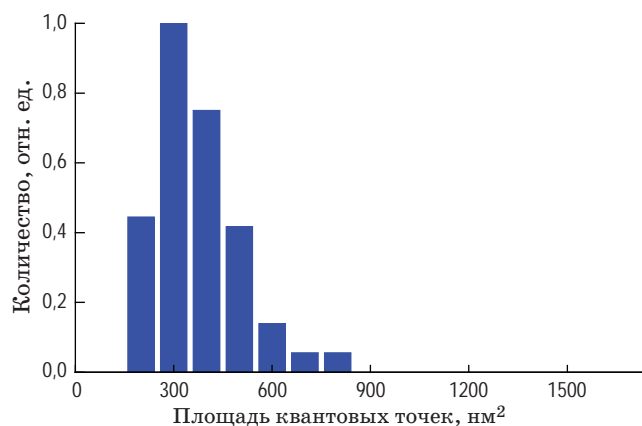


Рис. 6. Распределение по размеру квантовых точек, полученных при температуре 550 °С

Fig. 6. Size distribution of quantum dots obtained at a temperature of 550 °C

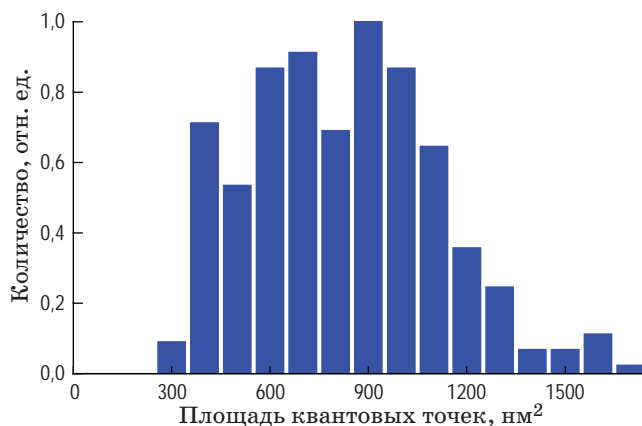


Рис. 7. Распределение по размеру квантовых точек, полученных при температуре 600 °С

Fig. 7. Size distribution of quantum dots obtained at a temperature of 600 °C

и размеры квантовых точек. Повышение температуры выше критической точки влечёт за собой резкое уменьшение плотности квантовых точек, кроме того, происходит значительное увеличение их размеров, что препятствует возникновению квантовых эффектов. Образец, полученный при 550 °С, имеет высокую плотность квантовых точек, и, что примечательно, большое отношение длины основания наностроек к их ширине. При этом образец имеет узкое распределение квантовых точек по размерам. Поэтому данная температура представляет большой интерес для получения удлинённых островков и квантовых нитей [16].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе была получена зависимость отношения периодов колебаний интенсивности, соответствующих времени формирования террасы типа В и типа А при синтезе Si на Si(100), при анализе методом дифракции быстрых отражённых электронов в широком диапазоне температур. Установлены доминирующие механизмы роста ступеней при заданной температуре. В результате исследований синтеза Si на Si(100) экспериментально определены температуры, при которых наблюдается островковый режим роста (менее 500 °С), комбинированный: островковый режим с режимом роста по сдвигу ступеней (550 °С), режим роста по сдвигу ступеней (600 °С и более).

Определено, что максимальное сближение ступеней происходит при критической температуре около 550 °С. Исходя из этого, было

решено, что температура 550 °С является приоритетной для синтеза квантовых точек. Для анализа влияния механизмов роста на формирование квантовых точек Ge на Si(100) были выбраны температуры 470–600 °С. Оценка плотности и размеров квантовых точек проводилась с помощью сканирующей электронной микроскопии.

Эксперименты по определению зависимости морфологии квантовых точек Ge от режимов роста на Si(100) дали следующие результаты:

1. Наибольшая плотность нанокластеров получается при режиме роста за счёт образования 2D островков.

2. Режим роста за счёт сдвига ступеней позволяет получать квантовые точки большего размера по сравнению с островковым режимом роста. При 600 °С распределение нанокластеров по размеру имеет более широкий диапазон значений по сравнению с меньшими температурами. Однако такие большие островки не могут использоваться в качестве чувствительных элементов.

3. Переход от островкового механизма роста к росту за счёт сдвига ступеней приводит к смещению максимума распределения нанокластеров в сторону увеличения размера.

Таким образом, результаты работы относятся к технологии создания оптических элементов на основе кремний-германиевых наноструктур и позволяют подобрать оптимальные параметры синтеза квантовых точек для их применения в оптоэлектронике и нанофотонике.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Battaglia C., Cuevas A., Wolf S.D. High-efficiency crystalline silicon solar cells: status and perspectives // *Energy Environ. Sci.* 2016. V. 9. P. 1552–1576. <https://doi.org/10.1039/C5EE03380B>
2. Badawy W.A. A review on solar cells from Si-single crystals to porous materials and quantum dots // *Journal of Advanced Research.* 2015. V. 6. № 2. P. 123–132. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2013.10.001>
3. Войцеховский А.В., Дзядух С.М., Горн Д.И., Михайлов Н.Н., Дворецкий С.А., Сидоров Г.Ю., Якушев М.В. Униполярные барьерные структуры на основе n-HgCdTe со сверхрешётками в качестве барьера. Обзор // *Оптический журнал.* 2024. Т. 91. № 2. С. 6–22. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-02-6-22>
4. Mohamed A.H., Mohamed K.Z., Hani E.E.-Ali. Review: Geometric interpretation of reflection and transmission RHEED patterns // *Micron.* 2022. V. 159. P. 103286. <https://doi.org/10.1016/j.micron.2022.103286>

REFERENCES

1. Battaglia C., Cuevas A., Wolf S.D. High-efficiency crystalline silicon solar cells: status and perspectives // *Energy Environ. Sci.* 2016. V. 9. P. 1552–1576. <https://doi.org/10.1039/C5EE03380B>
2. Badawy W.A. A review on solar cells from Si-single crystals to porous materials and quantum dots // *Journal of Advanced Research.* 2015. V. 6. № 2. P. 123–132. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2013.10.001>
3. Voitsekhovskii A.V., Dzyadukh S.M., Gorn D.I., Mikhailov N.N., Dvoretzky S.A., Sidorov G.Yu., Yakushev M.V. Unipolar barrier structures based on n-HgCdTe with superlattices as a barrier. Review [In Russian] // *Opticheskiy Zhurnal.* 2024. V. 91. № 2. P. 6–22. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-02-6-22>
4. Mohamed A.H., Mohamed K.Z., Hani E.E.-Ali. Review: Geometric interpretation of reflection and transmission RHEED patterns // *Micron.* 2022. V. 159. P. 103286. <https://doi.org/10.1016/j.micron.2022.103286>

5. Dirko V.V., Lozovoy K.A., Kokhanenko A.P., Voit-sekhovskii A.V. High-resolution RHEED analysis of dynamics of low-temperature superstructure transitions in Ge/Si(001) epitaxial system // *Nanotechnology*. 2022. V. 33. № 11. P. 115603. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ac3f56>
6. Арапкина Л.В., Юрьев В.А. Классификация нуклеусов Ge в массивах, формируемых на поверхности Si (001) методом молекулярно-лучевой эпитаксии при низких температурах // *Успехи физических наук*. 2010. Т. 180. С. 289–302. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0180.201003e.0289>
7. Tersoff J., Tromp R.M. Shape transition in growth of strained islands: Spontaneous formation of quantum wires // *Physical Review Letters*. 1993. V. 70. P. 2782–2785. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.70.2782>
8. Духан Р.М.Х., Коханенко А.П., Лозовой К.А. Параметры фоточувствительных структур на основе наногетероструктур Ge/Si // *Известия вузов. Физика*. 2018. Т. 61. № 7. С. 8–14.
9. Voigtländer B. Fundamental processes in Si/Si and Ge/Si epitaxy studied by scanning tunneling microscopy during growth // *Surface Science Reports*. 2001. V. 43. № 5–8. P. 127–254. [https://doi.org/10.1016/S0167-5729\(01\)00012-7](https://doi.org/10.1016/S0167-5729(01)00012-7)
10. Эрвье Ю.Ю., Есин М.Ю., Дерябин А.С. и др. Сближение ступеней на поверхности Si(100): эксперимент и моделирование // *Известия вузов. Физика*. 2023. Т. 66. № 4 (785). С. 85–92. <https://doi.org/10.17223/00213411/66/4/10>
11. Есин М.Ю., Дерябин А.С., Колесников А.В. и др. Изучение кинетики сближения ступеней поверхности Si(100) // *Физика твердого тела*. 2023. Т. 65. № 2. С. 173–179. <https://doi.org/10.21883/FTT.2023.02.54287.476>
12. Swartzentruber B.S., Kitamura N., Lagally M.G. et al. Behavior of steps on Si(001) as a function of vicinity // *Phys. Rev. B*. 1993. V. 47. № 20. P. 13432–13441. <https://doi.org/10.1103/physrevb.47.13432>
13. Mo Y.-W., Lagally M.G. Anisotropy in surface migration of Si and Ge on Si(001) // *Surface Science*. 1991. V. 248. № 3. P. 313–320. [https://doi.org/10.1016/0039-6028\(91\)91177-Y](https://doi.org/10.1016/0039-6028(91)91177-Y)
14. Эрвье Ю.Ю. Образование двойных ступеней на поверхности кремния (100): роль проницаемости А-ступеней // *Известия вузов. Физика*. 2020. Т. 63. № 6. С. 3–7. <https://doi.org/10.17223/00213411/63/6/3>
15. Kukunov O.I., Sokolov A.S., Dirko V.V. et al. Analysis of the temperature dependence of homoepitaxial growth of Si on Si by reflection high-energy electron diffraction // *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*. 2023. V. 16. № 3.1. P. 112–116. <https://doi.org/10.18721/JPM.163.120>
16. Liu K., Berbezier I., Favre L. et al. Self-organization of SiGe planar nanowires via anisotropic elastic field // *Physical Review Materials*. 2019. V. 3. P. 023403. <https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.3.023403>
5. Dirko V.V., Lozovoy K.A., Kokhanenko A.P., Voit-sekhovskii A.V. High-resolution RHEED analysis of dynamics of low-temperature superstructure transitions in Ge/Si(001) epitaxial system // *Nanotechnology*. 2022. V. 33. № 11. P. 115603. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ac3f56>
6. Arapkina, L.V., Yuryev V.A. Classification of Ge hut clusters in arrays formed by molecular beam epitaxy at low temperatures on the Si(001) surface // *Physics-Uspokhi*. 2010. V. 53. № 3. P. 289–302. <https://doi.org/10.3367/ufne.0180.201003e.0289>
7. Tersoff J., Tromp R.M. Shape transition in growth of strained islands: Spontaneous formation of quantum wires // *Physical Review Letters*. 1993. V. 70. P. 2782–2785. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.70.2782>
8. Douhan R.M.H., Kokhanenko A.P., Lozovoy K.A. Parameters of photo-sensitive structures based on Ge/Si nanostructures // *Russian Physics Journal*. 2018. V. 61. № 7. P. 1194–1201. <https://doi.org/10.1007/s11182-018-1517-0>
9. Voigtländer B. Fundamental processes in Si/Si and Ge/Si epitaxy studied by scanning tunneling microscopy during growth // *Surface Science Reports*. 2001. V. 43. № 5–8. P. 127–254. [https://doi.org/10.1016/S0167-5729\(01\)00012-7](https://doi.org/10.1016/S0167-5729(01)00012-7)
10. Hervieu Y.Y., Yesin M.Yu., Deryabin A.S. et al. Convergence of steps on the Si(100) surface: experiment and modeling [in Russian] // *Russian Physics Journal*. 2023. V. 66. № 4. P. 85–92. <https://doi.org/10.17223/00213411/66/4/10>
11. Yesin M.Yu., Deryabin A.S., Kolesnikov A.V. et al. Study of the kinetics of approaching steps of the Si(100) surface [in Russian] // *Solid State Physics*. 2023. V. 65. № 2. P. 173–179. <https://doi.org/10.21883/PSS.2023.02.55397.476>
12. Swartzentruber B.S., Kitamura N., Lagally M.G. et al. Behavior of steps on Si(001) as a function of vicinity // *Phys. Rev. B*. 1993. V. 47. № 20. P. 13432–13441. <https://doi.org/10.1103/physrevb.47.13432>
13. Mo Y.-W., Lagally M.G. Anisotropy in surface migration of Si and Ge on Si(001) // *Surface Science*. 1991. V. 248. № 3. P. 313–320. [https://doi.org/10.1016/0039-6028\(91\)91177-Y](https://doi.org/10.1016/0039-6028(91)91177-Y)
14. Hervieu Y.Y. Formation of double steps on Si (100): Effect of permeability of the A-steps // *Russian Physics Journal*. 2020. V. 63. № 6. P. 901–906. <https://doi.org/10.1007/s11182-020-02116-1>
15. Kukunov O.I., Sokolov A.S., Dirko V.V. et al. Analysis of the temperature dependence of homoepitaxial growth of Si on Si by reflection high-energy electron diffraction // *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*. 2023. V. 16. № 3.1. P. 112–116. <https://doi.org/10.18721/JPM.163.120>
16. Liu K., Berbezier I., Favre L. et al. Self-organization of SiGe planar nanowires via anisotropic elastic field // *Physical Review Materials*. 2019. V. 3. P. 023403. <https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.3.023403>

АВТОРЫ

Олжас Игоревич Кукунов — аспирант, инженер-исследователь, Томский государственный университет, Томск, 634050, Россия; Scopus ID: 57216270054; <https://orcid.org/0000-0002-8189-3749>; okukunov@mail.ru

Владимир Владиславович Дирко — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Томский государственный

AUTHORS

Olzhas I. Kukunov — Graduate Student, Research Engineer, Tomsk State University, Tomsk, 634050, Russia; Scopus ID: 57216270054; <https://orcid.org/0000-0002-8189-3749>; okukunov@mail.ru

Vladimir V. Dirko — PhD in Physics and Mathematics, Senior Researcher, Tomsk State University, Tomsk, 634050, Russia;

университет, Томск, 634050, Россия; Scopus ID: 57202785215; <https://orcid.org/0009-0008-8052-3253>; vovenmir@gmail.com

Арсений Сергеевич Соколов — магистр, младший научный сотрудник, Томский государственный университет, Томск, 634050, Россия; Scopus ID: 58750666100; <https://orcid.org/0009-0007-7811-0946>; ars856570@gmail.com

Кирилл Александрович Лозовой — канд. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией, Томский государственный университет, Томск, 634050, Россия; Scopus ID: 55932919800; <https://orcid.org/0000-0002-4029-8353>; lozovoymailbox@mail.ru

Кристина Игоревна Швалева — аспирант, младший научный сотрудник, Томский государственный университет, Томск, 634050, Россия; Scopus ID: 57221941622; <https://orcid.org/0009-0000-2898-4513>; homiackowa.kristina@yandex.ru

Андрей Павлович Коханенко — доктор физ.-мат. наук, профессор, Томский государственный университет, Томск, 634050, Россия; Scopus ID: 6601992810; <https://orcid.org/0000-0002-7091-3011>; kokh@mail.tsu.ru

Александр Васильевич Войцеховский — доктор физ.-мат. наук, профессор, Томский государственный университет, Томск, 634050, Россия; Scopus ID: 7003912639; <https://orcid.org/0000-0002-1196-6199>; vav43@mail.tsu.ru

Scopus ID: 57202785215; <https://orcid.org/0009-0008-8052-3253>; vovenmir@gmail.com

Arseniy S. Sokolov — Master's Student, Junior Researcher, Tomsk State University, Tomsk, 634050, Russia; Scopus ID: 58750666100; <https://orcid.org/0009-0007-7811-0946>; ars856570@gmail.com

Kirill A. Lozovoy — PhD in Physics and Mathematics, Head of Laboratory, Tomsk State University, Tomsk, 634050, Russia; Scopus ID: 55932919800; <https://orcid.org/0000-0002-4029-8353>; lozovoymailbox@mail.ru

Kristina I. Shvaleva — Graduate Student, Junior Researcher, Tomsk State University, Tomsk, 634050, Russia; Scopus ID: 57221941622; <https://orcid.org/0009-0000-2898-4513>; homiackowa.kristina@yandex.ru

Andrey P. Kokhanenko — Dr.Sc. in Physics and Mathematics, Professor, Tomsk State University, Tomsk, 634050, Russia; Scopus ID: 6601992810; <https://orcid.org/0000-0002-7091-3011>; kokh@mail.tsu.ru

Alexander V. Voitsekhovskii — Dr.Sc. in Physics and Mathematics, Professor, Tomsk State University, Tomsk, 634050, Russia; Scopus ID: 7003912639; <https://orcid.org/0000-0002-1196-6199>; vav43@mail.tsu.ru

*Статья поступила в редакцию 26.01.2024
Одобрена после рецензирования 04.03.2024
Принята к печати 29.04.2024*

*The article was submitted to the editorial office 26.01.2024
Approved after review 04.03.2024
Accepted for publication 29.04.2024*