

УДК 539.231:535.215
EDN: ОРНАХО

PACS: 85.60.Gz; 68.65.Hb; 81.10.Aj

Влияние режимов синтеза на характеристики микрорезонаторов германия-кремния на толстом оксидном слое кремния© О. Кукунов, В. В. Дирко, К. А. Лозовой*, К. Майер, О. Ворсин, К. Смородин,
В. Катренко, Г. Шабанов, А. Г. Коротаев, А. П. Коханенко

Томский государственный университет, г. Томск, 634050 Россия

*E-mail: lozovoymailbox@mail.ru

Статья поступила в редакцию 12.05.2026; после доработки 29.05.2026; принята к публикации 06.08.2026

Шифр научной специальности: 1.3.11

Определены зависимости структурных параметров германиевых микрорезонаторов, сформированных на окисленной кремниевой поверхности (средний размер островков, распределение размеров островков, отношение высоты островков к их диаметру и поверхностная плотность островков), от условий отжига после роста. Исследованы оптические характеристики полученных гетероструктур с микрорезонаторами. Продемонстрирована потенциальная возможность их использования в качестве поглощающих структур, а также антиотражающих покрытий для определенных длин волн. Предложены методы управления геометрическими и оптическими характеристиками ансамблей микрорезонаторов путем изменения параметров их эпитаксиального синтеза.

Ключевые слова: микрорезонаторы, кремний, германий, молекулярно-лучевая эпитаксия, атомно-силовая микроскопия, спектры пропускания, спектры отражения.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-4-13-18

Введение

Микрорезонаторы (резонаторы Ми) способны локализовать и усиливать электромагнитное поле на определенных резонансных длинах волн. При интеграции с квантовыми точками такие структуры обеспечивают существенное усиление оптического отклика, что повышает эффективность регистрации слабых сигналов в фоточувствительных устройствах [1, 2].

Важным фактором, определяющим функциональные возможности микрорезонаторов, являются их антиотражающие свойства, которые позволяют повысить эффективность и чувствительность оптоэлектронных приборов при их интеграции в активные структуры. Размещение микрорезонаторов на поверхности приводит к значительному снижению коэффициента отражения в опреде-

ленных спектральных диапазонах, которые задаются их геометрическими параметрами. Этот эффект обусловлен возникновением рассеяния Ми при взаимодействии электромагнитного излучения с неоднородностями поверхности, характерные размеры которых сопоставимы с длиной волны падающего излучения [3].

В результате рассеяния Ми характер отражения излучения от поверхности изменяется: вместо преимущественно зеркального отражения возникает диффузное рассеяние, при котором часть падающего излучения перераспределяется по различным направлениям. При этом значительная доля энергии распространяется вдоль поверхности структуры, что способствует более эффективному вводу излучения в материал. Такой механизм приводит к увеличению пропускания и снижению отражательных потерь в широком спектральном диапазоне [1].

Молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ) позволяет получать чистые наноструктуры с минимальным количеством дефектов [4]. Дифракция быстрых отраженных электронов (ДБОЭ) используется для анализа морфологии поверхности образца [5]. ДБОЭ позволяет контролировать морфологию поверхности в процессе роста с точностью менее одного монослоя (МС) [6]. Контроль эпитаксиальных процессов за счет изменения температуры и скорости осаждения, использования специальных подложек позволяет создавать самоорганизующиеся структуры с необходимыми параметрами и желаемыми свойствами [7]. В последнее время особое внимание уделяется разработке и эпитаксиальному созданию фоточувствительных элементов [8, 9] на основе германий-кремниевых микрорезонаторов, включая создание на их основе антиотражающих покрытий [10, 11].

Методы

В настоящей работе микрорезонаторы германия создавались на окисленной поверхности кремния методом молекулярно-лучевой эпитаксии с последующим отжигом в условиях сверхвысокого вакуума. В качестве подложек при осаждении германия использовались пластины Si(001). Экспериментальные исследования проводились на установке МЛЭ «Катунь-100». После предэпитаксиальной подготовки пластины Si(001) на нее магнетронным способом наносился толстый оксидный слой SiO₂ (около 100 нм). Затем на окисленную подложку наносился твердый раствор GeSi различной толщины с процентным содержанием Ge 30 %. Скорость осаждения определялась методом дифракции быстрых отраженных электронов по осцилляциям интенсивности при осаждении материалов на подложку Si(001) без оксидного слоя. Осаждение происходило при температуре 400 °С для исключения сегрегации Ge и создания равномерного слоя. После осаждения слоев германия и кремния проводился отжиг полученных структур при температуре 800 °С и различных длительностях отжига.

Контроль состояния поверхности в процессе роста осуществлялся с помощью метода дифракции быстрых отраженных электронов. После синтеза морфология поверхности исследовалась методом атомно-силовой микро-

скопии. Оптические характеристики полученных структур исследовались методом оптической спектроскопии на диффузное отражение с помощью спектрофотометра Shimadzu UV-3600 Plus. Проводилось сравнение измеренных спектров с расчетными, полученными в среде Lumerical методом конечных разностей во временной области.

Результаты

Судя по данным ДБОЭ-исследований, проводимых в процессе всего эксперимента, пленка GeSi до отжига имеет аморфную структуру, о чем свидетельствует наличие двух широких размытых диффузных гало. Во время отжига структура становится поликристаллической: на ДБОЭ-картинах формируются кольца Дебая – Шеррера. По завершении отжига на картине дополнительно возникают рефлексы, соответствующие дифракции на просвет от периодической структуры.

В результате отжига структур с осажденным слоем твердого раствора кремния-германия на окисленной поверхности кремния происходило формирование ансамбля наноструктур с характерными размерами 150–250 нм и высотой 100–250 нм. На рисунке 1 приводится СЭМ-изображение образца с толщиной осажденного слоя твердого раствора (эффективной толщиной 33 нм), подвергнутого отжигу при температуре 800 °С в течение 1 часа. Анализ изображения позволяет оценить поверхностную плотность ($\sim 1 \times 10^9 \text{ см}^{-2}$) и распределение островков по размерам. Средний размер островков при данных условиях отжига составил 200 нм.

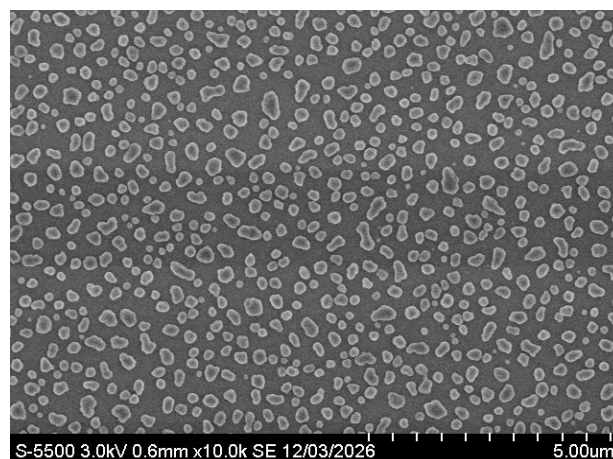


Рис. 1. СЭМ-изображение образца с микрорезонаторами германия-кремния (эффективной толщиной 33 нм) на магнетронном оксиде кремния

Для более подробного изучения геометрических характеристик полученных наноструктур (в том числе их высоты) образцы были исследованы методом атомно-силовой микроскопии в полуконтактном режиме с помощью кантилевера с радиусом закругления 2 нм. Исследование морфологических характеристик сформированных микрорезонаторов методом атомно-силовой микроскопии позволило определить распределения по высоте и диаметру основания, а также оценить их поверхностную плотность. На рисунке 2 приведены зависимости среднего диаметра основания (d) и отношения высоты к диаметру (h/d) от толщины осажденного слоя кремния-германия для образцов с отжигом при 800 °С в течение 1 часа.

В соответствии с рисунком 2 с увеличением эффективной толщины осажденного твердого раствора размер островков увеличи-

вается. Диаметр островков d возрастает практически линейно, в то время как отношение высоты к диаметру h/d растет нелинейно, постепенно приближаясь к единице.

Эксперименты по изменению параметров послеростового отжига показали, что увеличение температуры или длительности отжига приводит к увеличению диаметра и уменьшению параметра h/d .

Для изучения оптического отклика структур были зарегистрированы спектры пропускания и диффузного отражения в широком спектральном диапазоне. В качестве иллюстрации на рисунке 3 представлены спектры диффузного отражения двух образцов со средними размерами островков 150 и 200 нм. Наблюдается явно резонансный характер спектров отражения таких наноструктур, а также существенная зависимость вида спектра от размеров микрорезонаторов.

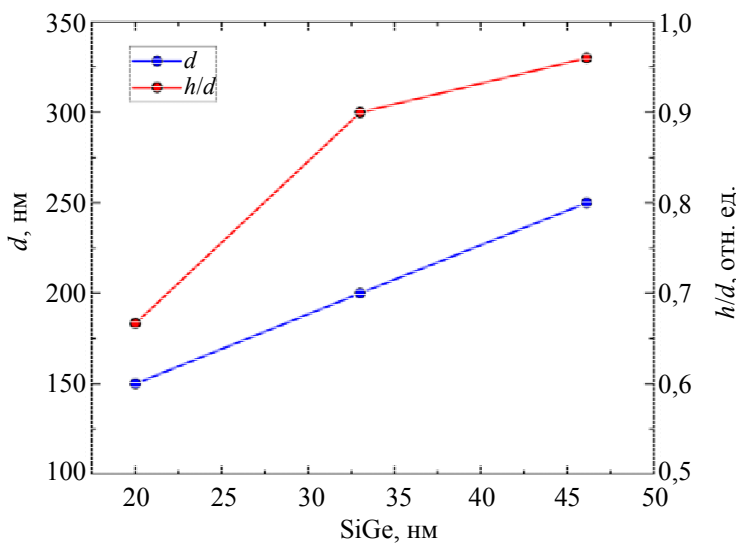


Рис. 2. Зависимость диаметра основания d (синяя кривая) и отношения высоты к диаметру основания h/d (красная кривая) от толщины осажденного твердого раствора кремния-германия

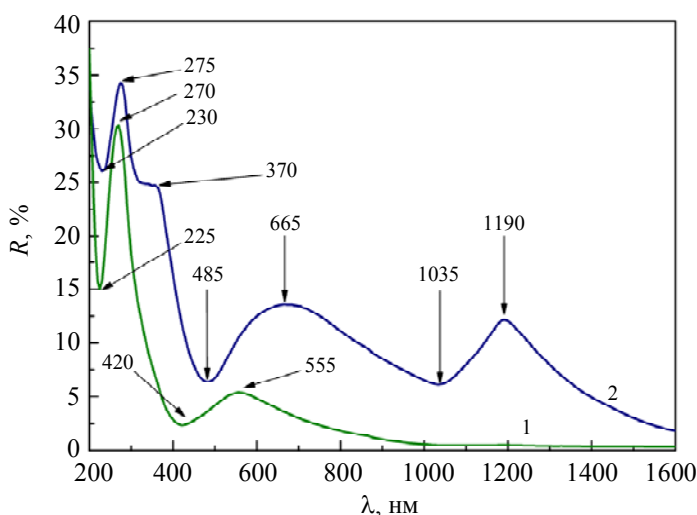


Рис. 3. Экспериментальные спектры диффузного отражения структур с микрорезонаторами кремния-германия на толстом слое оксида кремния средним размером 150 нм (кривая 1) и 200 нм (кривая 2)

В спектрах отражения наблюдаются чередующиеся максимумы и минимумы, обусловленные возбуждением резонансов Ми в наноструктурах. При этом для исходной поверхности кремния вклад диффузного отражения пренебрежимо мал, поскольку отражение носит преимущественно зеркальный характер. Вне резонансных областей спектры пропускания структур с микрорезонаторами практически совпадают с пропусканием исходной кремниевой подложки.

Результаты численного моделирования оптических характеристик слоев с микрорезонаторами

диаметром 150 и 200 нм и значениями отношения $h/d = 1$ представлены на рисунке 4. В расчетных спектрах более отчетливо проявляются особенности, связанные с размерными резонансами. Показано, что увеличение диаметра островков приводит к появлению дополнительных резонансных экстремумов на спектрах отражения. Тем не менее, расчетные данные дают пока лишь предварительную информацию о реальных спектрах, так как они не учитывают большого разброса островков по размерам, неизбежно существующего в выращенных образцах.

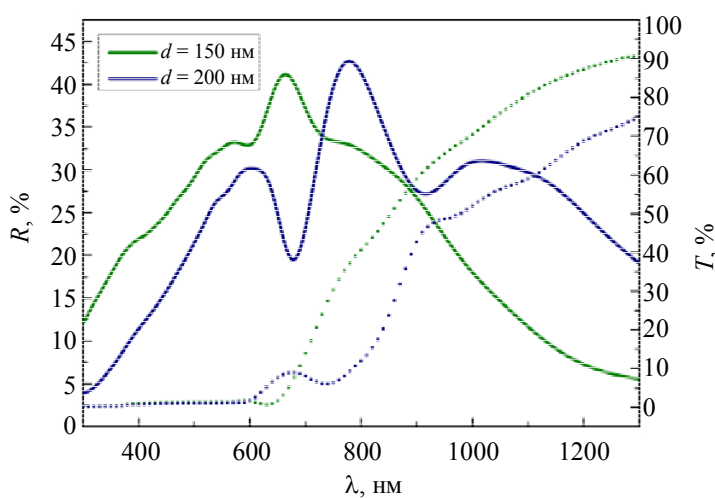


Рис. 4. Расчетные спектры отражения (сплошные линии) и пропускания (пунктирные линии) слоя с микрорезонаторами диаметром 150 и 200 нм

Сопоставление экспериментальных и расчетных данных (рисунки 3 и 4) демонстрирует качественное согласие наличия экстремумов интенсивности только в узком диапазоне длин волн 550–650 нм. Наблюдаемые различия в абсолютных значениях коэффициентов отражения и пропускания, а также в количестве и ширине резонансных пиков обусловлены неизбежным разбросом размеров сформированных островков, приводящим к сглаживанию спектральных особенностей.

Измерения спектров отражения, выполненные при различных углах падения и регистрации излучения, не выявили существенной угловой зависимости интенсивности. Это указывает на преимущественно диффузный характер отражения в структурах с GeSi-микрорезонаторами на окисленной поверхности кремния. Анализ образцов с различными значениями h/d показывает, что уменьшение отражения и повышение пропускания достигаются при увеличении отношения высоты

микрорезонаторов к диаметру их основания. Это связано с улучшением условий для одновременного проявления электрического и магнитного резонанса в таких структурах [11].

Заключение

В результате исследования определены зависимости структурных параметров формируемых микрорезонаторов германия на толстом слое оксида кремния (среднего размера островков, распределения островков по размерам, отношения высоты к диаметру островка, поверхностной плотности островков) от режимов послеростового отжига. Определены оптические характеристики полученных гетероструктур с микрорезонаторами. Показана перспективность их применения не только в качестве поглощающих структур, но и в качестве антиотражающих покрытий для определенных длин волн. Предложены пути управ-

ления геометрическими и оптическими характеристиками ансамбля микрорезонаторов за счет изменения параметров их эпитаксиального синтеза.

Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда № 25-12-20004,
<https://rscf.ru/project/25-12-20004/>
и Администрации Томской области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kuznetsov A. I., Miroshnichenko A. E., Brongersma M. L., et al. / Science. 2016. Vol. 354. № 6314. P. aag2472.
2. Войцеховский А. В., Коханенко А. П., Лозовой К. А. и др. / Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 3. С. 338–343.
3. Aladim A. K., Aouassa M., Bouabdellaoui M. et al. / Journal of Alloys and Compounds. 2025. Vol. 1042. P. 184169.
4. Dirko V. V., Lozovoy K. A., Kokhanenko A. P., Voitsekhovskii A. V. / Physical Chemistry Chemical Physics. 2020. Vol. 22. P. 19318–19325.
5. Hafez M. A., Zayed M. K., Elsayed-Ali H. E. / Micron. 2022. Vol. 159. P. 103286.
6. Dirko V. V., Lozovoy K. A., Kokhanenko A. P., Voitsekhovskii A. V. / Nanotechnology. 2022. Vol. 33. № 11. P. 115603 (1–8).
7. Shklyayev A. A., Latyshev A. V. / Scientific Reports. 2020. Vol. 10. P. 13759.
8. Ma T., Xue N., Muhammad A., et al. / Micromachines. 2024. Vol. 15. P. 1249.
9. Mitchell C. J., Hu T., Sun S., et al. / APL Photonics. 2024. Vol. 9. P. 080901.
10. Aouassa M., Bouabdellaoui M., Pessoa W. B., et al. / Journal of Materials Science: Materials in Electronics. 2025. Vol. 36. P. 394.
11. Shklyayev A. A., Utkin D. E., Tsarev A. V., et al. / Vacuum. 2025. Vol. 233. P. 113976.

PACS: 85.60.Gz; 68.65.Hb; 81.10.Aj

The influence of growth modes on the characteristics of germanium-silicon microresonators on a thick silicon oxide layer

O. Kukenov, V. V. Dirko, K. A. Lozovoy*, X. Maier, O. Vorsin, K. Smorodin, V. Katrenko, G. Shabanov, A. G. Korotaev, and A. P. Kokhanenko

Tomsk State University, Tomsk, 634050 Russia

*E-mail: lozovoymailbox@mail.ru

Received 12.05.2026; revised 29.05.2026; accepted 06.08.2026

In this study dependences of the structural parameters of germanium microresonators formed on an oxidized silicon surface (average island size, island size distribution, island height-to-diameter ratio, and island surface density) on post-growth annealing conditions were determined. Optical characteristics of the resulting heterostructures with microresonators were investigated. Their potential for use as absorbing structures as well as antireflection coatings for certain wavelengths was demonstrated. Methods for controlling the geometric and optical characteristics of microresonator ensembles by varying the parameters of their epitaxial synthesis were proposed.

Keywords: microresonators, silicon, germanium, molecular beam epitaxy, atomic force microscopy, transmission spectra, reflectance spectra.

REFERENCES

1. Kuznetsov A. I., Miroshnichenko A. E., Brongersma M. L., et al., Science **354** (6314), aag2472 (2016).
2. Voitsekhovsky A. V., Kokhanenko A. P., Lozovoy K. A., et al., Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics), **1** (3), 338–343 (2013) [in Russian].

3. Aladim A. K., Aouassa M., Bouabdellaoui M. et al., *Journal of Alloys and Compounds* **1042**, 184169 (2025).
4. Dirko V. V., Lozovoy K. A., Kokhanenko A. P., and Voitsekhovskii A. V., *Physical Chemistry Chemical Physics* **22**, 19318–19325 (2020).
5. Hafez M. A., Zayed M. K., and Elsayed-Ali H. E., *Micron* **159**, 103286 (2022).
6. Dirko V. V., Lozovoy K. A., Kokhanenko A. P., and Voitsekhovskii A. V., *Nanotechnology* **33** (11), 115603 (1–8) (2022).
7. Shklyayev A. A. and Latyshev A. V., *Scientific Reports* **10**, 13759 (2020).
8. Ma T., Xue N., Muhammad A., et al., *Micromachines* **15**, 1249 (2024).
9. Mitchell C. J., Hu T., Sun S., et al., *APL Photo-nics*. **9**, 080901 (2024).
10. Aouassa M., Bouabdellaoui M., Pessoa W. B., et al., *Journal of Materials Science: Materials in Electro-nics*. **36**, 394 (2025).
11. Shklyayev A. A., Utkin D. E., Tsarev A. V., et al., *Vacuum* **233**, 113976 (2025).

Об авторах

Кукенов Олжас, аспирант, Томский государственный университет (634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, д. 36). E-mail: okukenov@mail.ru ORCID: 0000-0002-8189-3749

Дирко Владимир Владиславович, аспирант, Томский государственный университет (634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, д. 36). E-mail: vovenmir@gmail.com ORCID: 0009-0008-8052-3253

Лозовой Кирилл Александрович, к.ф.-м.н., доцент, Томский государственный университет (634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, д. 36). E-mail: lozovoymailbox@mail.ru, ORCID: 0000-0002-4029-8353

Майер Ксения, магистрант, Томский государственный университет (634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, д. 36). E-mail: kseniamayer955@gmail.com

Ворсин Олег, магистрант, Томский государственный университет (634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, д. 36). E-mail: janekroll2018@gmail.com

Смородин Константин, магистрант, Томский государственный университет (634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, д. 36). E-mail: Smorodinkosta232@gmail.com

Катренко Владислав, студент, Томский государственный университет (634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, д. 36). E-mail: vladislav.katrenko_2005@mail.ru

Шабанов Генрих, студент, Томский государственный университет (634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, д. 36). E-mail: altx65@gmail.com

Коротаев Александр Григорьевич, к.ф.-м.н., декан, Томский государственный университет (634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, д. 36). E-mail: kor@mail.tsu.ru

Коханенко Андрей Павлович, д.ф.-м.н., профессор, Томский государственный университет (634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, д. 36). E-mail: kokh@mail.tsu.ru, ORCID: 0000-0002-7091-3011