

06

Буферные структуры GaAs/Si, полученные методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений

© С.О. Слипченко, В.В. Шамахов, М.И. Кондратов, Е.В. Фомин, Д.Н. Николаев, А.В. Мясоедов, Н.А. Берт, Н.А. Пихтин

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: serghpl@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 1 ноября 2025 г.

В окончательной редакции 8 декабря 2025 г.

Принято к публикации 9 декабря 2025 г.

Методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений на подложках Si выращены буферные слои GaAs толщиной от 1 до 5.3 μm . Показано, что плотность прорастающих дислокаций уменьшается до $4 \cdot 10^7 \text{ cm}^{-2}$ с увеличением толщины буферного слоя GaAs до 5.3 μm . Среднеквадратичная шероховатость поверхности достигает наименьшего значения 2.2 nm при толщине буферного слоя GaAs 1.6 μm .

Ключевые слова: газофазная эпитаксия, буферные слои, подложка Si.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.07.62523.20553

В настоящее время бурно развиваются фотонные интегральные схемы (ФИС) на основе Si, поскольку они обладают такими преимуществами, как высокая скорость передачи данных, малые потери в волноводах и низкая стоимость [1,2]. Однако из-за непрямозонной структуры кремния возникают сложности с созданием эффективных и надежных источников света [3]. Для этой роли хорошо подходят источники света на основе соединений $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$, а именно на основе GaAs и InP [4–6]. Сегодня основными методами интеграции материалов $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ с кремнием являются сращивание пластин или трансферная печать, а также в последнее время активно развивается эпитаксиальный рост материалов $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ на подложке Si [7]. Непосредственный эпитаксиальный рост материалов $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ имеет определенные преимущества перед двумя другими методами интеграции, так как позволяет создать компактные и плотно интегрированные ФИС с высокой масштабируемостью, сниженными стоимостью и энергопотреблением [8].

Однако непосредственный рост соединений $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ (например, GaAs и InP) сопряжен с рядом сложностей [9]. Это большое несоответствие постоянных решеток (GaAs — 4.1 %, InP — 8 %) и коэффициентов теплового расширения (GaAs — $6.6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, InP — $4.6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, Si — $2.3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) между материалами группы $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ и Si, что приводит к высокой плотности прорастающих дислокаций, появлению дефектов упаковки и образованию механических трещин в слое соединения $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$. Отсутствие центра инверсии для соединений $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ со структурой цинковой обманки (сфалерит) приводит к образованию еще одного типа плоского кристаллического дефекта — антифазных границ (АГ) — при эпитаксии на подложке Si с ориентацией (001). Одним из способов борьбы с АГ является использование разориентированных подложек [10,11]. Более сложной задачей является борьба с прорастающими дислокация-

ми (ПД). Для этого используют комплекс мер, среди которых можно выделить многостадийный температурный рост [12,13], термоциклический отжиг [14,15], а также использование дислокационных фильтров [16–18]. При этом задача получения эпитаксиальных слоев $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ с низкой плотностью ПД (ППД), выращенных на подложке Si, сохраняет свою актуальность в настоящее время. При этом оптимальная конструкция буфера — это компромисс между значениями ППД и среднеквадратичной шероховатостью (СКШ) поверхности. Кроме того, буферный слой не должен иметь макродефектов и трещин.

В настоящей работе представлены результаты исследования влияния толщины буферного слоя GaAs, выращенного на подложке Si, на ППД и СКШ. Поскольку оба эти параметра оказывают влияние на качество материала и его оптические свойства, выбор оптимальной толщины буферного слоя на основании этих двух параметров является важной задачей. При этом использование простейшего буфера на основе только GaAs можно позиционировать как наиболее доступное и технологичное решение. Также следует отметить, что данные исследования являются единственными демонстрирующими возможность роста на установке газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений с вертикальным реактором турбодискового типа.

Для создания буферных слоев использовался метод газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений. Рост буферных слоев GaAs осуществлялся в вертикальном реакторе турбодискового типа на подложках Si (001) с разориентацией 4° в направлении [110]. Разориентированные подложки Si были выбраны как наиболее простой способ борьбы с образованием АГ при росте буферного слоя GaAs. Перед ростом подложка Si обрабатывалась в водном растворе HF для удаления естественного оксида с ее поверхности. При росте бу-

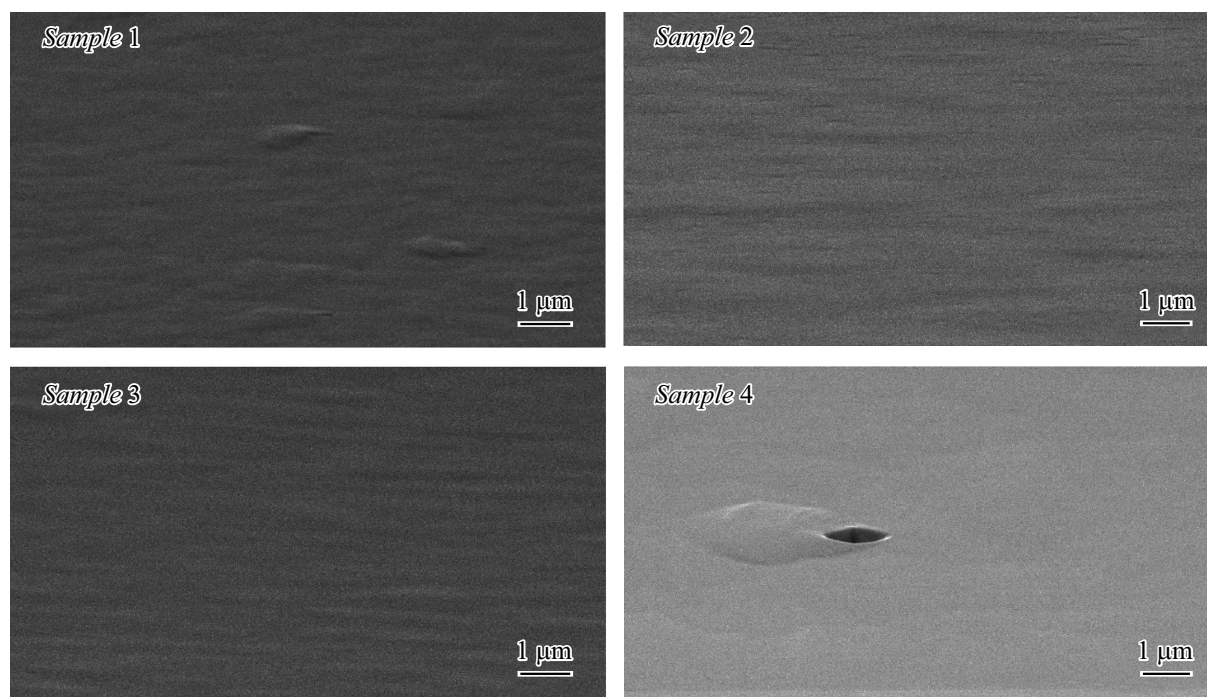


Рис. 1. РЭМ-изображения поверхности буферных слоев GaAs различной толщины: образец № 1 — $1\text{ }\mu\text{m}$, образец № 2 — $1.6\text{ }\mu\text{m}$, образец № 3 — $2\text{ }\mu\text{m}$, образец № 4 — $5.3\text{ }\mu\text{m}$.

ферного слоя GaAs использовались реагенты элементов III группы (триметилгаллий) и элементов V группы (арсин). Газ-носитель — водород. Рост буферных слоев GaAs начинался при пониженной температуре ($400\text{ }^{\circ}\text{C}$), далее в процессе роста температура повышалась до значения $650\text{ }^{\circ}\text{C}$, оптимального для создания слоев GaAs с наилучшими структурными характеристиками. В рамках настоящей работы был получен ряд образцов с различной толщиной высокотемпературного слоя GaAs. Были выращены образцы с различной толщиной буферного слоя GaAs: образец № 1 — $1\text{ }\mu\text{m}$, образец № 2 — $1.6\text{ }\mu\text{m}$, образец № 3 — $2\text{ }\mu\text{m}$, образец № 4 — $5.3\text{ }\mu\text{m}$. Далее проводились исследования структурных характеристик выращенных образцов методами растровой электронной микроскопии (РЭМ), атомно-силовой микроскопии (АСМ) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). Исследования морфологии поверхности были выполнены на растровом электронном микроскопе JEOL JSM 7001F, а также на атомно-силовом микроскопе NTEGRA (NT-MDT Spectrum Instruments) в прерывисто-контактном режиме с использованием зондов ETALON HA_FM (сканирование изображений производилось на площади $10 \times 10\text{ }\mu\text{m}^2$). Оценка ППД проводилась на просвечивающих электронных микроскопах Philips EM420 и JEM Jeol 2100F при ускоряющем напряжении 100 и 200 kV соответственно. Прозрачные для электронов образцы были приготовлены по стандартной методике, включающей резку, шлифовку, полировку и ионное распыление.

На рис. 1 представлены РЭМ-изображения поверхности образцов, полученные при одинаковом увеличе-

нии. На изображениях видно, что поверхность является волнистой для всех образцов. При этом заметно качественное отличие характерной структуры поверхности. Наиболее выраженный рельеф наблюдается для образца № 1, который имеет наименьшую толщину буферного слоя GaAs. По мере увеличения толщины буферного слоя GaAs наблюдается увеличение латеральных размеров характерных структурных элементов, формирующих поверхностный рельеф. Кроме того, при меньшем увеличении на поверхности образца № 4 были зафиксированы трещины, которые являются следствием больших механических напряжений, возникающих из-за существенной разницы в коэффициентах теплового расширения подложки Si и буферного слоя GaAs, появляющихся при охлаждении структуры от температуры эпитаксии до комнатной температуры. В этом случае чем больше разница между температурой роста и комнатной температурой, тем меньше критическая толщина буферного слоя GaAs, при которой начинают образовываться трещины. Для остальных образцов подобные особенности не наблюдались.

С целью более детального исследования морфологии поверхности для всех образцов проводились измерения с использованием АСМ. На рис. 2 представлены АСМ-изображения поверхности образцов размером $10 \times 10\text{ }\mu\text{m}$. На основе полученных АСМ-изображений была определена СКШ поверхности, которая наравне с ППД является важной характеристикой буферного слоя GaAs, выращенного на подложке Si. Измерения показали, что по мере увеличения толщины буферного слоя GaAs от 1 до $1.6\text{ }\mu\text{m}$ наблюдается снижение значе-

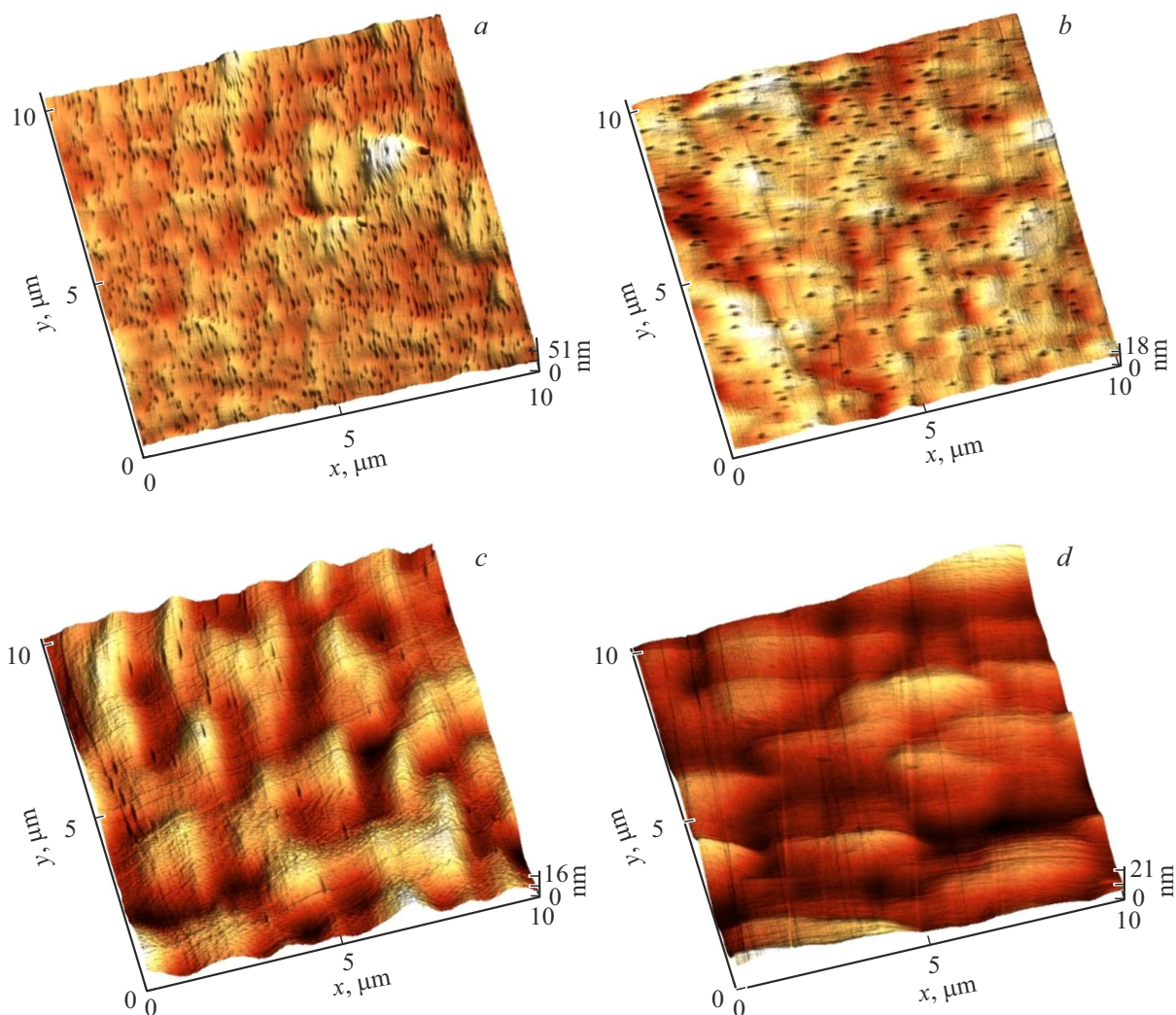


Рис. 2. АСМ-изображения поверхности буферных слоев GaAs различной толщины: *a* — $1\text{ }\mu\text{m}$ (образец № 1), *b* — $1.6\text{ }\mu\text{m}$ (образец № 2), *c* — $2\text{ }\mu\text{m}$ (образец № 3), *d* — $5.3\text{ }\mu\text{m}$ (образец № 4). Площадь сканирования $10 \times 10\text{ }\mu\text{m}^2$.

ния СКШ: образец № 1 — 4 nm , образец № 2 — 2.2 nm . Однако дальнейшее увеличение толщины с 1.6 до $5.3\text{ }\mu\text{m}$ сопровождается повышением СКШ: образец № 3 — 2.5 nm , образец № 4 — 2.9 nm . Среднеквадратичная ошибка при АСМ-измерениях не превышала 0.1 nm . Кроме того, можно предположить, что темные вытянутые штрихи на АСМ-изображениях являются ПД. На рисунке видно, что ППД уменьшается от образца № 1 к образцу № 4. Оценка, сделанная на основании данных рис. 2, дает следующие значения ППД: образец № 1 — более 10^9 cm^{-2} , образец № 2 — $7 \cdot 10^8\text{ cm}^{-2}$, образец № 3 — $3.1 \cdot 10^7\text{ cm}^{-2}$, образец № 4 — $7 \cdot 10^6\text{ cm}^{-2}$.

Для образцов № 3 и 4 были получены ПЭМ-изображения приповерхностного сечения буферного слоя GaAs, приготовленного в планарной геометрии (рис. 3). ПЭМ-методика позволяет провести прямое измерение значения ППД для приповерхностной области буферного слоя. В рамках настоящей работы с целью снижения влияния фактора неоднородного распределения ПД при малой их плотности для каждого образца было

получено по пять изображений для различных участков поверхности, на основании которых была определена средняя ППД. Для образца № 3 разброс ППД составил от $4 \cdot 10^7$ до $1.2 \cdot 10^8\text{ cm}^{-2}$, для образца № 4 — от $2.4 \cdot 10^7$ до $7.7 \cdot 10^7\text{ cm}^{-2}$. Усредненная ППД для образца № 3 составила $7 \cdot 10^7\text{ cm}^{-2}$, а для образца № 4 — $4 \cdot 10^7\text{ cm}^{-2}$. Сравнивая результаты для ППД, полученные из АСМ-изображений, можно отметить, что они дают заниженные значения по сравнению с ПЭМ-изображениями. Это объясняется тем, что АСМ характеризует непосредственно поверхность эпитаксиальной пленки, в то время как ПЭМ имеет дело с приповерхностной областью толщиной до нескольких сотен нанометров.

Одним из механизмов снижения ППД является их взаимодействие между собой. На рис. 3 стрелками на ПЭМ-изображениях обозначены области взаимодействия ПД в объеме буферного слоя GaAs. Взаимодействие ПД может приводить к образованию дислокаций несоответствия с новым вектором Бюргерса и снижению ППД.

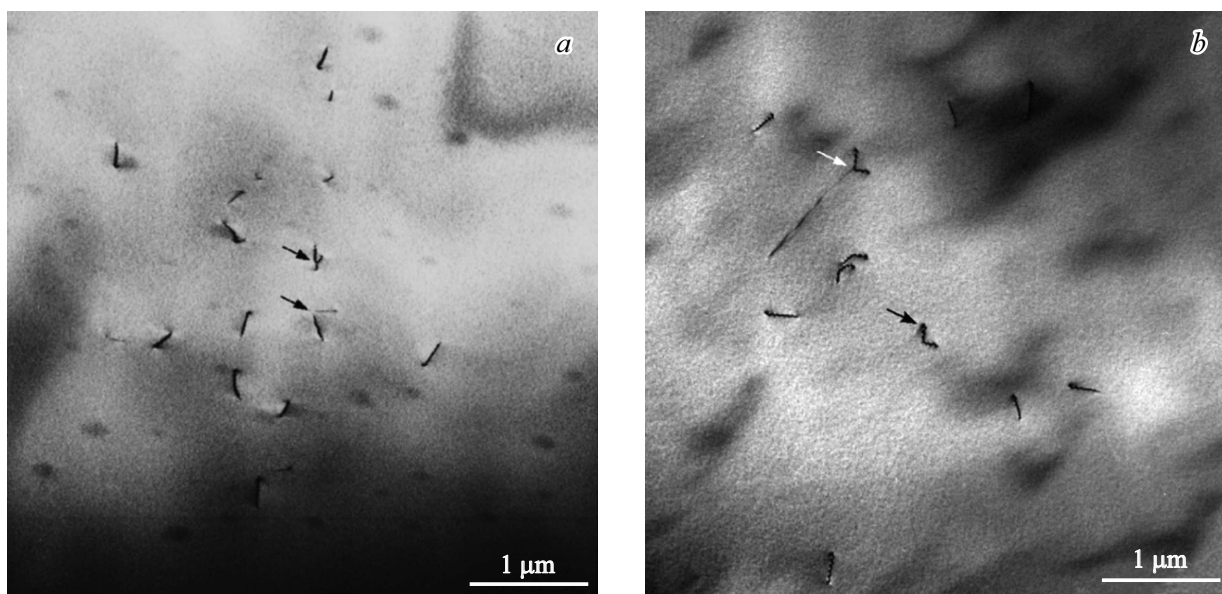


Рис. 3. Светлопольные ПЭМ-изображения сечения буферного слоя GaAs в планарной геометрии, полученные вблизи оси зоны [001]. Толщина буферного слоя GaAs: *a* — 2 μm (образец № 3), *b* — 5.3 μm (образец № 4).

Светлой стрелкой на рис. 3, *b* обозначена область взаимодействия двух ПД, в результате которого образовалась одна дислокация несоответствия, горизонтальный фрагмент линии которой наблюдается на изображении. Уменьшение ППД с увеличением толщины буферного слоя GaAs приводит к снижению степени взаимодействия дислокаций между собой.

Полученные результаты показывают, что использование простейшего буферного слоя на основе GaAs и оптимизация его толщины позволяют снизить ППД до $4 \cdot 10^7 \text{ cm}^{-2}$. Однако при толщине буферного слоя GaAs 5.3 μm в нем наблюдается образование механических трещин, что делает его непригодным для дальнейшего использования. Также показано, что СКШ поверхности буферного слоя GaAs уменьшается до 2.2 nm при увеличении толщины до 1.6 μm , а затем происходит незначительное увеличение значения СКШ до 2.9 nm при увеличении толщины до 5.3 μm .

На основании полученных результатов для дальнейших исследований нами был выбран буферный слой GaAs толщиной 2 μm , который является компромиссным решением по значениям ППД и СКШ. Также при выборе учитывался тот факт, что на буферном слое в дальнейшем должна быть выращена лазерная структура с квантовыми ямами или квантовыми точками и суммарная толщина с учетом буферного слоя должна обеспечивать отсутствие механических трещин в структуре. Для дальнейшего уменьшения ППД в буферном слое GaAs нами планируется использовать дислокационные фильтры (ДФ). Обычно в качестве ДФ используются напряженные сверхрешетки или наборы объемных напряженных слоев. Чаще всего в качестве ДФ применяются напряженные сверхрешетки в количестве до четырех штук. Использование ДФ может увеличить суммарную

толщину буферного слоя GaAs до 3 μm в зависимости от толщины разделяющих слоев GaAs между ДФ. При этом СКШ такого буфера может увеличиться, и по нашим оценкам удовлетворительное значение СКШ в буферном слое GaAs с ДФ не должно превышать 3.5 nm.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] J.C. Norman, D. Jung, Y. Wan, J.E. Bowers, *APL Photon.*, **3** (3), 030901 (2018). DOI: 10.1063/1.5021345
- [2] J. Yang, M. Tang, S. Chen, H. Liu, *Light Sci. Appl.*, **12** (1), 16 (2023). DOI: 10.1038/s41377-022-01006-0
- [3] Y. Han, H. Park, J. Bowers, K.M. Lau, *Adv. Opt. Photon.*, **14** (3), 404 (2022). DOI: 10.1364/AOP.455976
- [4] С.О. Слипченко, Д.А. Веселов, В.В. Золотарев, А.В. Лютецкий, А.А. Подоскин, З.Н. Соколова, В.В. Шамахов, И.С. Шашкин, П.С. Копьев, Н.А. Пиктин, *Квантовая электроника*, **52** (12), 1152 (2022). [S.O. Slipchenko, D.A. Veselov, V.V. Zolotarev, A.V. Lyutetskii, A.A. Podoskin, Z.N. Sokolova, V.V. Shamakhov, I.S. Shashkin, P.S. Kop'ev, N.A. Pikhtin, *Bull. Lebedev Phys. Inst.*, **50** (4), 494 (2023). DOI: 10.3103/S1068335623160108].
- [5] Н.А. Волков, А.Ю. Андреев, И.В. Яроцкая, Ю.Л. Рябоштан, В.Н. Светогоров, М.А. Ладугин, А.А. Падалица, А.А. Мармалюк, С.О. Слипченко, А.В. Лютецкий, Д.А. Веселов, Н.А. Пиктин, *Квантовая электроника*, **51** (2), 133 (2021). [N.A. Volkov, A.Yu. Andreev, I.V. Yarotskaya, Yu.L. Ryaboshstan, V.N. Svetogorov, M.A. Ladugin, A.A. Padalitsa, A.A. Marmalyuk, S.O. Slipchenko, A.V. Lyutetskii, D.A. Veselov, N.A. Pikhtin, *Quantum Electron.*, **51** (2), 133 (2021). DOI: 10.1070/QEL17480].

- [6] J.-S. Park, H. Deng, S. Pan, H. Wang, Y. Wang, J. Yuan, X. Zhang, H. Zeng, H. Jia, M. Dang, *J. Phys. D*, **58** (18), 185101 (2025). DOI: 10.1088/1361-6463/adc275
- [7] A.Y. Liu, J. Bowers, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **24** (6), 6000412 (2018). DOI: 10.1109/JSTQE.2018.2854542
- [8] C. Shang, Y. Wan, J. Selvidge, E. Hughes, R. Herrick, K. Mukherjee, J. Duan, F. Grillot, W.W. Chow, J.E. Bowers, *ACS Photon.*, **8** (9), 2555 (2021). DOI: 10.1021/acsp Photonics.1c00707
- [9] Y. Du, B. Xu, G. Wang, Y. Miao, B. Li, Z. Kong, Y. Dong, W. Wang, H.H. Radamson, *Nanomaterials*, **12** (5), 741 (2022). DOI: 10.3390/nano12050741
- [10] J. Yang, Z. Liu, P. Jurczak, M. Tang, K. Li, S. Pan, A. Sanchez, R. Beanland, J.-C. Zhang, H. Wang, *J. Phys. D*, **54** (3), 035103 (2021). DOI: 10.1088/1361-6463/abbb49
- [11] J. Yang, P. Jurczak, F. Cui, K. Li, M. Tang, L. Billiald, R. Beanland, A.M. Sanchez, H. Liu, *J. Cryst. Growth*, **514**, 109 (2019). DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2019.02.044
- [12] K. Ishida, *MRS Online Proc. Library*, **91**, 133 (1987). DOI: 10.1557/PROC-91-133
- [13] Y. Wang, Q. Wang, Z. Jia, X. Li, C. Deng, X. Ren, S. Cai, Y. Huang, *J. Vac. Sci. Technol. B*, **31** (5), 051211 (2013). DOI: 10.1116/1.4820914
- [14] D. Jung, P.G. Callahan, B. Shin, K. Mukherjee, A.C. Gossard, J.E. Bowers, *J. Appl. Phys.*, **122** (22), 225703 (2017). DOI: 10.1063/1.5001360
- [15] C. Shang, J. Selvidge, E. Hughes, J.C. Norman, A.A. Taylor, A.C. Gossard, K. Mukherjee, J.E. Bowers, *Phys. Status Solidi A*, **218** (3), 2000402 (2020). DOI: 10.1002/pssa.202000402
- [16] M. Tang, S. Chen, J. Wu, Q. Jiang, V.G. Dorogan, M. Benamara, Y.I. Mazur, G.J. Salamo, A. Seeds, H. Liu, *Opt. Express*, **22** (10), 11528 (2014). DOI: 10.1364/OE.22.011528
- [17] M. Tang, S. Chen, J. Wu, Q. Jiang, K. Kennedy, P. Jurczak, M.Y. Liao, R. Beanland, A. Seeds, H.Y. Liu, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **22** (6), 50 (2016). DOI: 10.1109/JSTQE.2016.2551941
- [18] M. Dang, H. Deng, S. Huo, R.R. Juluri, A.M. Sanchez, A.J. Seeds, H. Liu, M. Tang, *J. Phys. D*, **56** (40), 405108 (2023). DOI: 10.1088/1361-6463/ace36d