

07

Полупроводниковый оптический усилитель спектрального диапазона 1010–1075 nm с активной областью на основе квантовых яма-точек InGaAs/GaAs

© А.А. Харченко^{1,2}, А.Ю. Мороз^{1,3}, А.М. Надточий¹, Н.Ю. Гордеев², А.А. Бекман², С.А. Минтаиров²,
Н.А. Калюжный², М.В. Максимов¹

¹ Алферовский университет, Санкт-Петербург, Россия

² ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

³ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: antoshkerr@gmail.com

Поступило в Редакцию 18 августа 2026 г.

В окончательной редакции 2 сентября 2026 г.

Принято к публикации 2 сентября 2026 г.

Разработан и исследован полупроводниковый оптический усилитель с активной областью на основе гибридной наноструктуры — квантовые яма-точки InGaAs/GaAs. Прибор обеспечивает усиление более 10 dB внешнего лазерного излучения в спектральном диапазоне 1010–1075 nm с максимальным значением 30.5 dB на длине волны 1040 nm. Ширина полосы усиления (по уровню –3 dB) составила 28 nm. Значения входной и выходной мощностей насыщения составили 51 μ W и 29 mW соответственно.

Ключевые слова: квантовые яма-точки, полупроводниковые оптические усилители, коэффициент усиления, ток прозрачности.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.22.63891.20877

Полупроводниковые оптические усилители (ПОУ) широко применяются в современной фотонике, в частности, в качестве компонентов фотонных интегральных схем (ФИС). Они усиливают мощность излучения лазерных источников, повышают чувствительность фотоприемников, компенсируют оптические потери в пассивных элементах [1]. Быстрое развитие технологий топографического зондирования, авиационных и космических лидаров стимулирует интерес к разработке ФИС спектрального диапазона 1000–1100 nm, для которого характерно низкое атмосферное поглощение и существуют недорогие высокочувствительные кремниевые детекторы. Например, в работе [2] сообщается о монолитной интеграции лазеров и волноводов для ФИС на основе GaAs, работающих в спектральном диапазоне около 1030 nm. Еще одним развивающимся применением ФИС этого диапазона является оптическая когерентная томография (ОКТ) с перестраиваемым источником излучения (SS-OCT, Swept-Source Optical Coherence Tomography) [3]. При этом разработка и исследования ПОУ диапазона 1000–1100 nm пока представлены единичными работами. В [4] сообщается об усилителях с активной областью на основе квантовых ям InGaAs/GaAs с максимальным усилением 24 dB, шириной спектральной полосы 60 nm и максимальной выходной мощностью 20 mW. Высокие механические напряжения таких структур ограничивают объем активной области и тем самым оптическое усиление. В диапазоне 1260–1360 nm (О-диапазон) достаточно широко используются ПОУ на квантовых точках InAs/InGaAs благодаря их высокому быстродействию, при этом коэффициент оптического

усиления таких приборов, как правило, не превосходит ~ 20 dB [5]. Сообщений о ПОУ на квантовых точках (КТ) InAs/GaAs спектрального диапазона 1000–1100 nm авторам найти не удалось.

Настоящая работа посвящена ПОУ спектрального диапазона 1010–1075 nm с активной областью на основе квантовых яма-точек (КЯТ) InGaAs/GaAs. Технология синтеза и оптические свойства таких структур, которые можно рассматривать как модулированную по толщине и составу квантовую яму (КЯ) либо как плотный массив мелких КТ, подробно описаны в [6]. На основе КЯТ разработаны и исследованы суперлюминесцентные диоды [7], фотодетекторы с высоким модалным поглощением и настраиваемой чувствительностью к поляризации [8]. В нашей предыдущей работе [9] продемонстрирована возможность получения оптического усиления излучения внешнего источника в лазерных гетероструктурах с КЯТ. Целью настоящей работы являются разработка и создание ПОУ на основе КЯТ, а также определение их основных характеристик: коэффициента оптического усиления (в зависимости от длины волны, тока накачки и входной мощности), входной и выходной мощностей насыщения.

Исследуемые ПОУ были изготовлены на основе гетероструктуры, выращенной методом газовой фазной эпитаксии из металлоорганических соединений на подложке GaAs. Та же структура ранее использовалась для создания высокоомощных суперлюминесцентных диодов [7]. Активная область состояла из семи слоев КЯТ InGaAs с различной номинальной толщиной: четыре слоя ~ 1.2 nm, два ~ 1.7 nm и один ~ 2.3 nm.

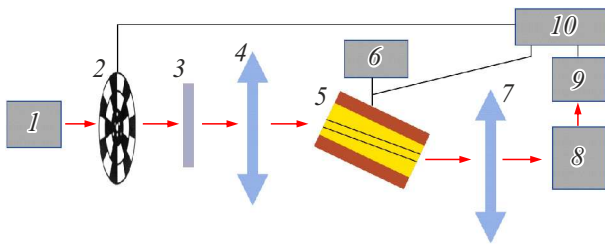


Рис. 1. Схематическое изображение экспериментальной установки для измерения выходной мощности и определения режима прозрачности ПОУ. 1 — перестраиваемый лазер, 2 — механический обтюратор, 3 — настраиваемый аттенуатор, 4 — микрообъектив, 5 — исследуемый ПОУ, 6 — источник постоянного тока, 7 — собирающая линза, 8 — монохроматор, 9 — фотодетектор, 10 — синхронный усилитель Lock-in.

Слои разделялись спейсерами GaAs толщиной 40 nm. Из структуры формировались образцы ПОУ с гребневым волноводом (полоском) шириной 20 μm , наклоненным под углом 10.5° к входной и выходной сколотым граням, без использования просветляющих покрытий.

Схема экспериментальной установки для исследования ПОУ представлена на рис. 1. ТЕ-поляризованное излучение перестраиваемого лазера (990–1075 nm) (1) мощностью 10 mW, модулируемое механическим обтюратором (2) на частоте 437 Hz и ослабляемое набором аттенуаторов (до –30 dB) (3), фокусировалось микрообъективом ($\times 100/\text{NA}0.5$) (4) на грань исследуемого ПОУ. Для эффективного ввода излучения в наклонный волновод (с учетом показателя преломления GaAs ~ 3.5) образец был ориентирован так, что угол между лазерным пучком и нормалью к входной грани составлял 39.6°. На образец подавался постоянный электрический ток I с источника (6). Излучение с выходной грани ПОУ собиралось линзой (7) на щель монохроматора (8), настроенного на длину волны перестраиваемого лазера и работающего как узкополосный (5 nm) оптический фильтр. Мощность измерялась калиброванным германиевым фотоприемником (9) на частоте модуляции с использованием двухканального синхронного усилителя (10), что позволило исключить вклад собственного излучения ПОУ. Часть излучения перестраиваемого лазера проходит мимо ПОУ, но регистрируется фотоприемником и является фоновой засветкой. Ее интенсивность была измерена в условиях отсутствия тока накачки усилителя, когда он поглощает все введенное в него излучение за счет высокого модального поглощения (70 cm^{-1} на один слой), характерного для КЯТ [8]. Величина фоновой засветки затем учитывалась при вычислении коэффициента усиления. Второй канал синхронного усилителя (10) использовался для измерения амплитуды и фазы напряжения на усилителе на частоте модуляции, необходимых для определения величины его тока прозрачности I_{tr} по ранее предложенной методике [9]. При токе прозрачности поглощение и усиление

в активной области ПОУ отсутствуют. Это позволяет, избегая прямого измерения коэффициента ввода, определить значение входной мощности усилителя, которая равна выходной $P_{out}(I_{tr})$ при его накачке током прозрачности. Кроме того, в этом режиме работы был измерен коэффициент оптических потерь в пассивных элементах экспериментальной установки, который равен отношению мощности на выходе установки к мощности с выходной грани усилителя.

С учетом калибровки и нормировки коэффициент усиления G исследуемых образцов ПОУ определялся выражением

$$G [\text{dB}] = 10 \lg \frac{P_{out}(I)}{P_{out}(I_{tr})}, \quad (1)$$

где $P_{out}(I)$ — измеренная выходная мощность при токе накачки I ; $P_{out}(I_{tr})$ — входная мощность, определяемая как выходная при условии прозрачности активной области ПОУ.

На рис. 2 представлены зависимости коэффициента усиления исследуемого ПОУ длиной 1.6 mm от длины волны входного излучения при токах накачки 100–400 mA и входной мощности –6 и –21 dBm. Спектры, полученные при входной мощности –21 dBm (спектры малосигнального усиления), расширяются в коротковолновую область с ростом тока накачки. Коэффициент усиления увеличивается с ростом тока накачки и при значении 400 mA достигает величины 30.5 dB на длине волны 1040 nm. Максимальный ток накачки был ограничен значением 400 mA, что соответствует типовым рабочим значениям для ПОУ и позволяет избежать нежелательных эффектов, связанных с разогревом активной области. Ширина спектральной полосы усиления по уровню –3 dB, определенная с учетом интерполяции экспериментальных точек, составляет 28 nm (1018–1046 nm). Пунктиром показан спектр, полученный при значительно большей входной мощности

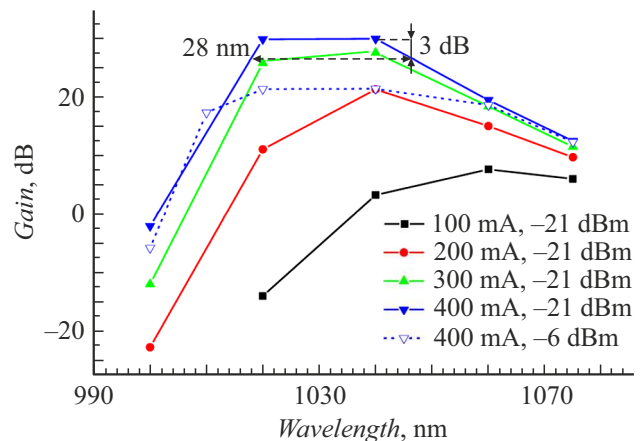


Рис. 2. Спектры усиления исследуемого ПОУ на основе КЯТ при различных токах накачки и входных мощностях. Длина образца 1.6 mm.

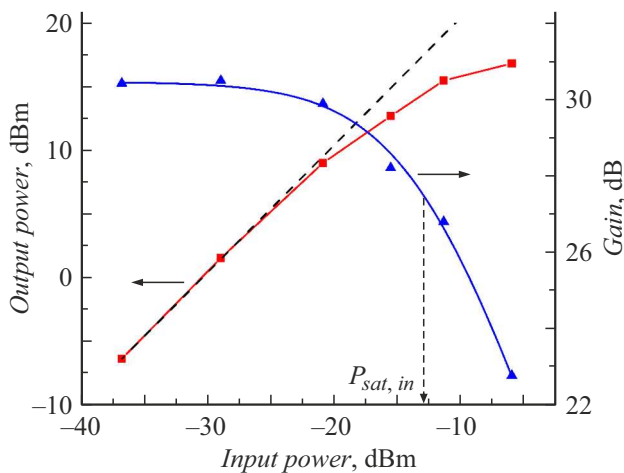


Рис. 3. Выходная мощность (квадраты) и коэффициент усиления ПОУ (треугольники) в зависимости от входной мощности при токе накачки 400 мА на длине волны 1040 нм. Штриховой линией показана модельная прямая линейного режима работы ПОУ. Зависимость коэффициента усиления от входной мощности аппроксимирована выражением (2).

–6 dBm при токе накачки 400 мА. Максимальное значение коэффициента усиления составило 21 dB, а ширина полосы усиления — 50 nm (от 1010 до 1060 nm). Такое поведение указывает на нелинейный режим работы ПОУ при больших входных мощностях в спектральном диапазоне 1010–1060 nm. На длинах волн 1060–1075 nm коэффициент усиления не уменьшается при увеличении мощности, и ПОУ демонстрирует линейный режим работы при всех исследуемых мощностях.

На рис. 3 представлены зависимости выходной мощности и коэффициента усиления от мощности входного излучения на длине волны 1040 nm при величине тока накачки 400 мА. Штриховой линией показана модельная прямая, соответствующая линейному режиму работы ПОУ.

При значениях входной мощности –37 и –29 dBm выходная мощность прямо пропорциональна входной, а коэффициент усиления остается постоянным. При величинах входной мощности более –21 dBm зависимость заметно отклоняется от линейной. Для аппроксимации зависимости коэффициента усиления от входной мощности мы воспользовались распространенным эмпирическим выражением [1]:

$$G = \frac{G_0}{1 + \frac{P_{in}}{P_{sat,in}}}, \quad (2)$$

где G_0 — малосигнальный коэффициент усиления, P_{in} — входная мощность, $P_{sat,in}$ — входная мощность насыщения (значение входной мощности, при которой коэффициент усиления уменьшается на 3 dB). Из аппроксимации были найдены значения $G_0 = 30.5 \pm 0.1$ dB, $P_{sat,in} = -12.9 \pm 0.3$ dBm (51 ± 4 μW). На основе этих данных легко вы-

числить значение выходной мощности насыщения $P_{sat,out} = P_{sat,in} + G_0 - 3\text{ dB} = 14.6 \pm 0.4$ dBm (29 ± 3 mW). По значению малосигнального коэффициента усиления ПОУ на КЯТ на 6 dB превосходит ПОУ на напряженных КЯ InGaAs/GaAs сопоставимого спектрального диапазона [4], однако обладает в 2 раза более узкой полосой усиления. Выходная мощность насыщения ПОУ на КЯТ в 1.5 раза превышает максимальную мощность ПОУ на КЯ InGaAs/GaAs. В дальнейшем планируется улучшить характеристики ПОУ на КЯТ за счет оптимизации состава активной области и нанесения просветляющих покрытий на сколы граней чипа.

На рис. 4 приведены спектры полного выходного излучения ПОУ (обтюратор на схеме на рис. 1 был переставлен после исследуемого образца) при входном излучении 1040 nm мощностью –21 и –6 dBm при токе накачки 400 мА. Также показаны спектры собственного излучения ПОУ в отсутствие входного излучения. При входной мощности –21 dBm прибор находится вблизи границы линейного режима работы, а интенсивность собственного излучения незначительно уменьшается (рис. 4, а). При вводе в ПОУ излучения мощностью –6 dBm собственное излучение ПОУ практически полностью пропадает. Данный эффект хорошо известен для ПОУ на КТ [10] и связан с увеличением скорости вынужденной рекомбинации носителей на частоте внешнего излучения при увеличении мощности последнего, приводящем к истощению инверсии населенности (опустошению уровней КЯТ) и уменьшению собственного спонтанного излучения ПОУ. Хорошее согласие экспериментальной зависимости G от P_{in} с выражением (2) (рис. 3) указывает на то, что истощение инверсии населенности в активной области прибора является доминирующим механизмом насыщения усиления, а такие эффекты, как спектральное или пространственное выжигание дыр, не проявляются [11]. Отметим, что линия лазерного излучения здесь значительно уширена вследствие понижения спектрального разрешения для повышения чувствительности. Спектры приведены исключительно для демонстрации эффекта модуляции спонтанного излучения внешним излучением. Данный эффект представляет интерес для реализации полностью оптической перекрестной модуляции сигнала (XGM, Cross-Gain Modulation) и логических элементов для ФИС [12]. В дальнейшем планируется более детальное исследование динамики перекрестной модуляции при одновременной работе двух сигнальных каналов, а также более детальное исследование ширины спектральных линий.

Таким образом, разработан и охарактеризован полупроводниковый оптический усилитель на основе квантовых ям-точек In_{0.4}Ga_{0.6}As/GaAs. Прибор обладает коэффициентом малосигнального усиления 15–30.5 dB в спектральном диапазоне 1010–1075 nm с максимальным значением на длине волны 1040 nm и шириной полосы усиления 28 nm. ПОУ на основе КЯТ демонстрируют перспективу для применения в фотонных интегральных

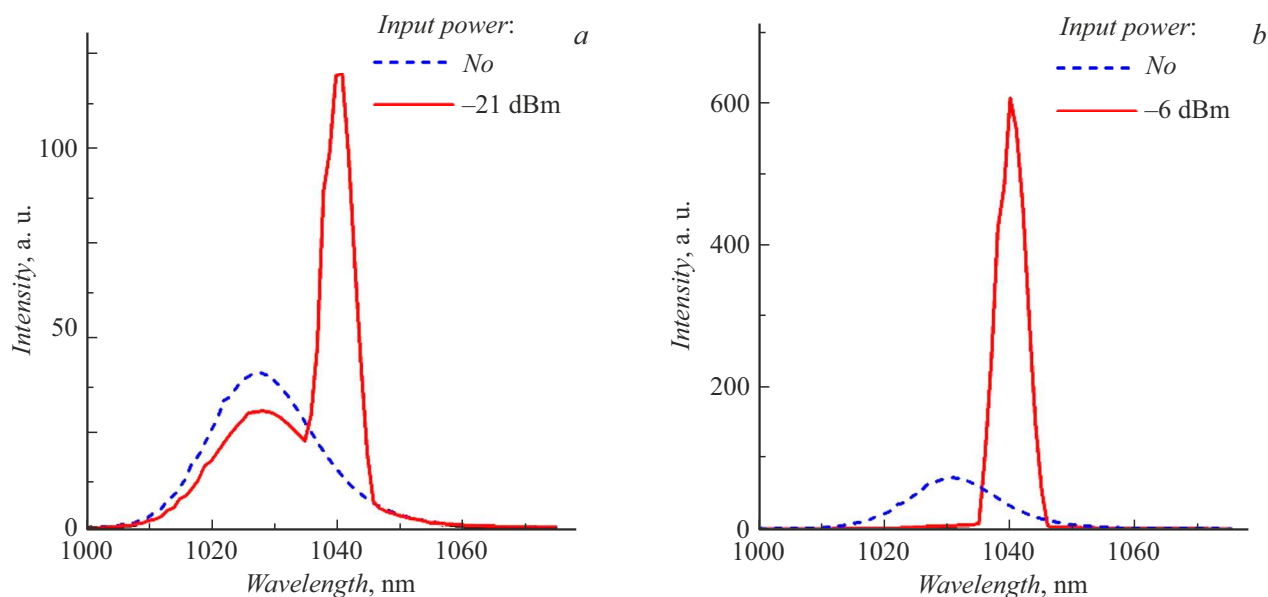


Рис. 4. Спектры выходного излучения ПОУ при низкой (а) и высокой (б) входных мощностях (сплошные линии), а также в отсутствие входного сигнала (штриховые линии) при токе накачки 400 мА.

схемах для лидаров и ОКТ. При вводе в ПОУ излучения длин волн 1020–1060 нм мощностью более -12.9 dBm ($51 \mu\text{W}$) прибор переходит в режим насыщения, что демонстрирует перспективу дальнейших исследований перекрестной оптической модуляции.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-72-00038 (<https://rscf.ru/project/23-72-00038/>). А.М. Надточий и А.Ю. Мороз благодарят Министерство науки и высшего образования РФ (проект FSRM-2026-0022) за поддержку экспериментальных исследований с использованием перестраиваемого твердотельного лазера.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A. Sobhanan, A. Anthur, S. O'Duill, M. Pelusi, S. Namiki, L. Barry, D. Venkitesh, G.P. Agrawal, *Adv. Opt. Photon.*, **14** (3), 571 (2022). DOI: 10.1364/AOP.451872
- [2] P. Verrinder, L. Wang, J. Fridlander, F. Sang, V. Rosborough, M. Nickerson, G. Yang, M. Stephen, L. Coldren, J. Klamkin, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **28** (1), 6100109 (2022). DOI: 10.1109/JSTQE.2021.3086074
- [3] S. Hao, A.J. Adkins, Y. Zhang, C. Zhou, in *CLEO 2024* (Optica Publ. Group, Washington, D.C., 2024), p. AT3B.5. DOI: 10.1364/CLEO_AT.2024.AT3B.5

- [4] Е.В. Андреева, С.Н. Ильченко, М.А. Ладугин, А.А. Лобинцов, А.А. Мармалюк, М.В. Шраменко, С.Д. Якубович, *Квантовая электроника*, **43** (11), 994 (2013). [E.V. Andreeva, S.N. Il'chenko, M.A. Ladugin, A.A. Lobintsov, A.A. Marmalyuk, M.V. Shramenko, S.D. Yakubovich, *Quantum Electron.*, **43** (11), 994 (2013). DOI: 10.1070/QE2013v043n11ABEH015248].
- [5] C. St-Arnault, S. Bernal, R. Gutiérrez-Castrejn, E. Berikaa, W. Li, Z. Wei, Y. Hu, M.S. Alam, J. Rautert, S.V. Poltavtsev, A.E. Gubenko, V.V. Belykh, V.S. Mikhlin, A.R. Kovsh, D.V. Plant, *J. Lightwave Technol.*, **43** (4), 1915 (2025). DOI: 10.1109/JLT.2024.3509402
- [6] M.V. Maximov, A.M. Nadtochiy, S.A. Mintairov, N.A. Kalyuzhnyy, N.V. Kryzhanovskaya, E.I. Moiseev, N.Y. Gordeev, Y.M. Shernyakov, A.S. Payusov, F.I. Zubov, V.N. Nevedomskiy, S.S. Rouvimov, A.E. Zhukov, *Appl. Sci.*, **10** (3), 1038 (2020). DOI: 10.3390/app10031038
- [7] G.O. Kornyshev, N.Y. Gordeev, Y.M. Shernyakov, A.A. Beckman, A.S. Payusov, S.A. Mintairov, N.A. Kalyuzhnyy, V.G. Dubrovskii, M.V. Maximov, *J. Lightwave Technol.*, **44** (13), 5621 (2026). DOI: 10.1109/JLT.2026.3688963
- [8] A.A. Kharchenko, A.M. Nadtochiy, S.A. Mintairov, Y.M. Shernyakov, A.A. Serin, N.Y. Gordeev, M.V. Maximov, A.E. Zhukov, *Nano-Struct. Nano-Objects*, **25**, 100628 (2021). DOI: 10.1016/j.nanos.2020.100628
- [9] А.А. Харченко, А.М. Надточий, Ю.М. Шерняков, Н.Ю. Гордеев, А.С. Паюсов, А.А. Бекман, Г.О. Корнышов, О.И. Симчук, Ю.А. Салий, М.М. Кулагина, С.А. Минтаиров, Н.А. Калужный, М.В. Максимов, *ФТП*, **58** (6), 313 (2024). DOI: 10.61011/FTP.2024.06.58945.6937 [A.A. Kharchenko, A.M. Nadtochiy, Yu.M. Shernyakov, N.Yu. Gordeev, A.S. Payusov, A.A. Beckman, G.O. Kornyshev, O.I. Simchuk, Yu.A. Salii, M.M. Kulagina, S.A. Mintairov, N.A. Kalyuzhnyy, M.V. Maximov, *Semiconductors*, **58** (6), 291 (2024). DOI: 10.61011/SC.2024.06.59452.6937].

- [10] T. Akiyama, M. Sugawara, Y. Arakawa, Proc. IEEE, **95** (9), 1757 (2007). DOI: 10.1109/JPROC.2007.900899
- [11] A.V. Uskov, E.P. O'Reilly, M. Laemmlin, N.N. Ledentsov, D. Bimberg, Opt. Commun., **248** (1-3), 211 (2005). DOI: 10.1016/j.optcom.2004.12.001
- [12] J. Cui, K.E. Zoiros, A. Kotb, Nanomaterials, **16** (3), 202 (2026). DOI: 10.3390/nano16030202