

08

Управляемое током и светом переключение длин волн лазерной генерации в лазерах на квантовых точках InAs/InGaAs/GaAs для использования в нейроморфной фотонике

© М.В. Максимов¹, Ф.И. Зубов¹, А.А. Бекман², Г.О. Корнышов², Н.Ю. Гордеев²,
А.А. Харченко¹, О.И. Симчук¹, Н.А. Калюжный², Ю.М. Шерняков²

¹ Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет им. Ж.И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, Россия

² ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: fedyazu@mail.ru

Поступило в Редакцию 22 июля 2025 г.

В окончательной редакции 5 августа 2025 г.

Принято к публикации 5 августа 2025 г.

Исследовано влияние оптической накачки светом с длиной волны 1260 nm на спектры лазеров на основе квантовых точек InAs/GaAs, находящихся в режиме генерации через основное состояние (1260 nm), возбужденное состояние (1180 nm), а также через оба указанных состояния одновременно. Накачка излучением основного состояния не меняет режима генерации лазеров, также излучающих через основное состояние, но приводит к подавлению генерации через возбужденное состояние. Чем больше интенсивность генерации через возбужденное состояние, тем большая мощность оптической инжекции требуется для ее подавления.

Ключевые слова: лазер, двухуровневая генерация, квантовые точки.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.21.61528.20450

В настоящее время разработка оптических интегральных схем, позволяющих имитировать поведение оптических нейронов, привлекает к себе значительное внимание. В оптоэлектронных устройствах наблюдаются эффекты, похожие на нервную возбудимость или периодические всплески (спайки) [1,2] при воздействии оптической или электронной инжекции. Чрезвычайно перспективным представляется использование лазеров на квантовых точках (КТ) для применения в нейроморфных фотонных схемах [3–5]. Переключение между режимами генерации на основном состоянии (ground state, GS) с длиной волны излучения 1260–1300 nm и на возбужденном состоянии (excited state, ES) с длиной волны излучения 1180–1220 nm в таких лазерах под действием оптической инжекции позволяет имитировать как возбуждающие, так и тормозные нейроны. Например, можно связать импульсы из длинноволнового спектрального диапазона (основного состояния КТ, GS) с сигналами нервного возбуждения, а импульсы из коротковолнового спектрального диапазона (возбужденного состояния КТ, ES) — с тормозными сигналами.

Недавно была продемонстрирована возможность создания полностью оптической нейроморфной схемы с использованием полупроводниковых лазеров на основе КТ InAs/InGaAs/GaAs [3]. Однако предложенная авторами той работы оптическая схема чрезвычайно сложна для реализации в интегральном исполнении, так как включает в себя оптические изоляторы, фильтры и линзы. В данной работе мы исследуем переключения режимов генерации в оптически связанных парах лазеров на

КТ, которые монтировались встык с зазором между зеркалами размером несколько микрометров. Данная схема является более простой по сравнению с предложенной в работе [3] и легко масштабируемой для использования в оптических интегральных схемах. Предварительные результаты исследований были опубликованы нами в [6]. В настоящей работе мы детально исследуем влияние тока инжекции и интенсивности дополнительной оптической накачки на спектры генерации лазеров, находящихся в режиме генерации через основное состояние (GS), возбужденное состояние (ES), а также одновременной генерации через GS и ES (двухуровневой генерации).

Лазерная гетероструктура была синтезирована методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложке n^+ -GaAs (100). Вначале выращивался буферный слой GaAs n -типа толщиной 0.3 μm , затем нижний эмиттер $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ n -типа толщиной 1.5 μm , волновод GaAs толщиной 450 nm, верхний эмиттер $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ p -типа толщиной 1.5 μm и контактный слой GaAs, легированный p^+ , толщиной 0.2 μm . Активная область представляла собой десять слоев КТ InAs/InGaAs/GaAs, разделенных спейсерами GaAs толщиной 35 nm и расположенных симметрично относительно центра волновода. КТ InAs/InGaAs/GaAs формировались в процессе заравнивания начальных трехмерных островков, осажденных в режиме Странского-Крастанова (0.8 nm InAs), слоем $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ толщиной 5 nm. Однородность ансамбля КТ оценивалась по полуширине спектра электролюминесценции лазера с малой длиной резонатора (0.1 mm) при низком токе накачки (20 mA) и

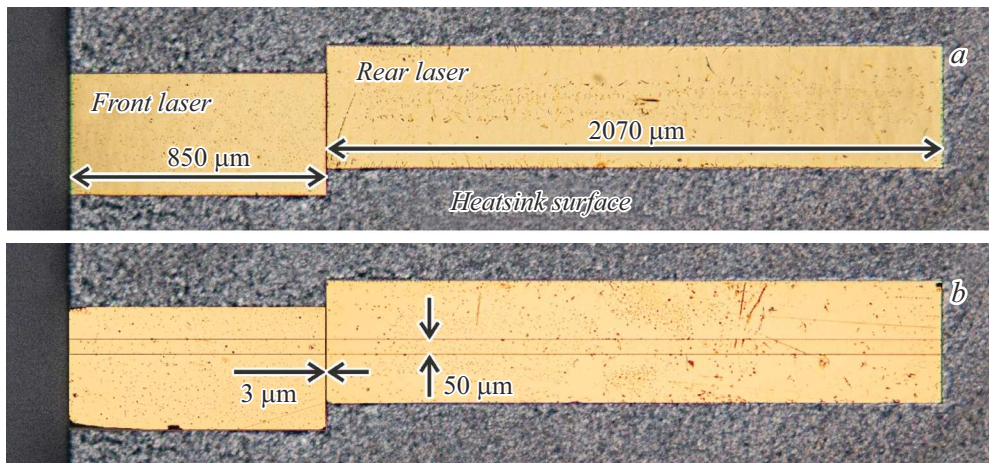


Рис. 1. *a* — фотография оптически связанных полосковых лазеров (вид сверху), смонтированных встык на теплоотводе *p*-стороной вниз; *b* — фотография, приведенная на части *a*, с наложенными изображениями чипов, снятыми с *p*-стороны до их монтажа.

составляла около 50 meV, что соответствует стандартному неоднородному уширению самоорганизующихся КТ InAs/InGaAs/GaAs. Из эпитаксиальной гетероструктуры методами оптической литографии и сухого травления были изготовлены торцевые лазеры шириной 50 μm , которые затем разделялись на отдельные чипы разной длины при помощи колки. Монтаж пар лазеров на теплоотводы осуществлялся на установке Finetech Lambda 2, обеспечивающей высокую точность совмещения (рис. 1). Непрерывная инжекционная накачка каждого из лазеров осуществлялась независимо. В процессе исследований температура теплоотводов стабилизировалась и составляла 20 °C. Излучение лазеров собиралось линзированным оптоволокном.

Спектры генерации в зависимости от длины резонатора и тока накачки в лазерах на КТ InAs/InGaAs/GaAs оптического диапазона 1.25–1.3 μm были ранее подробно исследованы в наших работах [7,8]. В исследуемых лазерах длиной более 800 μm генерация начинается на GS, однако при увеличении тока также возникает генерация на ES (двухуровневая генерация). Чем больше длина резонатора, тем выше порог двухуровневой генерации. В лазерах длиной менее 800 μm генерация сразу же начинается через ES. Далее мы описываем результаты исследований трех пар оптически связанных лазеров. В каждой паре исследуемый лазер монтируется у края теплоотвода (в дальнейшем будем называть его „передним лазером“). Второй лазер будет рассматриваться как источник оптической инжекции (накачки), в дальнейшем будем называть его „задним лазером“. Длина заднего лазера составляла 2070 μm , и соответственно его пороговый ток двухуровневой генерации был большим (> 4 А). В связи с этим в дальнейшем мы пренебрегаем влиянием излучения переднего лазера на лазерные характеристики заднего и рассматриваем его как источник стабильного излучения с длиной волны 1260 nm. Пороговый ток заднего лазера составлял 190 mA, а

ватт-амперная характеристика была линейной вплоть до тока выше 1000 mA. Таким образом, интенсивность оптической накачки переднего лазера линейно зависела от тока через задний лазер.

В первой серии экспериментов длина переднего лазера была выбрана равной 850 μm . Пороги генерации данного лазера на основном и возбужденном состояниях составляли $I_{th}^{GS} = 180 \text{ mA}$ и $I_{th}^{ES} = 590 \text{ mA}$ соответственно. На рис. 2, *a* представлены спектры генерации переднего лазера (оптического нейрона) при накачке излучением заднего лазера. Как видно из рис. 2, *a*, оптическая накачка переднего лазера излучением на длине волны GS не меняет режим работы переднего лазера. Наблюдается только уширение линии генерации на GS и небольшое возрастание ее интенсивности. При этом интенсивность спонтанного излучения ES уменьшается с ростом оптической накачки. Данные эффекты наблюдаются в широком диапазоне токов накачки переднего лазера (от 400 до 570 mA) и мощностей оптической инжекции (в диапазоне токов заднего лазера от порогового значения 190 mA до 1000 mA) (рис. 2, *b*). Максимальный ток накачки переднего лазера $I_{front} = 570 \text{ mA}$ был немного ниже порога возникновения генерации на ES. Таким образом, длина данного лазера и максимальный ток через него были выбраны так, чтобы он мог при относительно небольшом воздействии переключаться в режим двухуровневой генерации. Однако в противоположность результатам, полученным в [3] и в нашей предыдущей работе [6], мы не обнаружили возникновения лазерной генерации на ES ни при каких комбинациях токов и интенсивностей оптической инжекции. Можно предположить, что лазерная генерация на ES, наблюдаемая при отдельном значении тока в работах [3,6], может быть связана с перегревом и/или деградацией переднего лазера.

Во второй серии экспериментов использовался передний лазер с такой же длиной 850 μm , но его ток

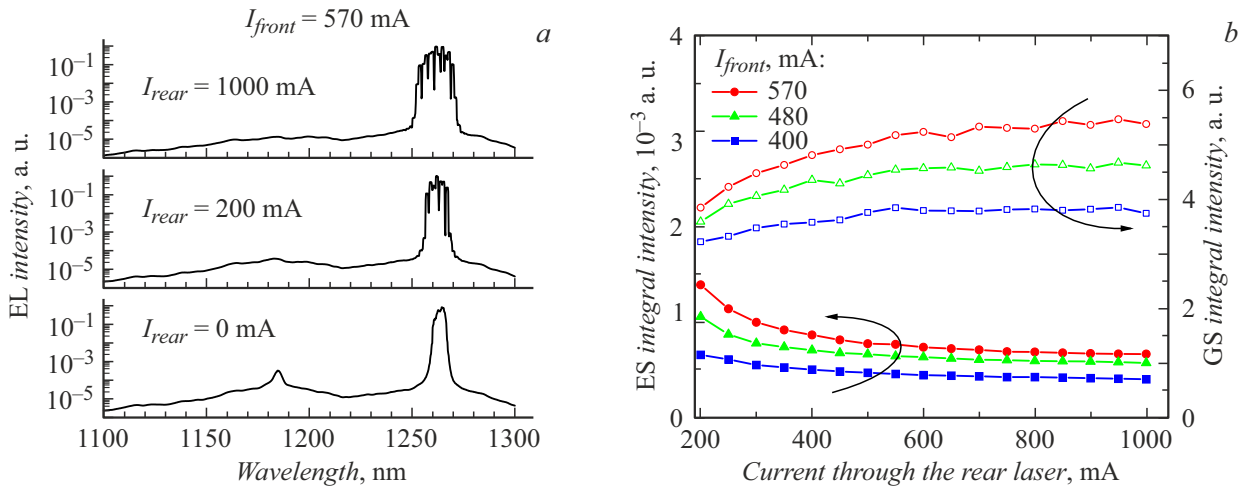


Рис. 2. *a* — спектры лазерной генерации переднего лазера длиной $850\ \mu\text{m}$ при различных токах через задний лазер. Ток переднего лазера ($I_{\text{front}} = 570\ \text{mA}$) ниже порога двухуровневой генерации. *b* — зависимости интенсивностей линий излучения GS и ES переднего лазера от тока накачки заднего лазера при различных токах через передний лазер. I_{front} и I_{rear} обозначают токи через передний и задний лазеры.

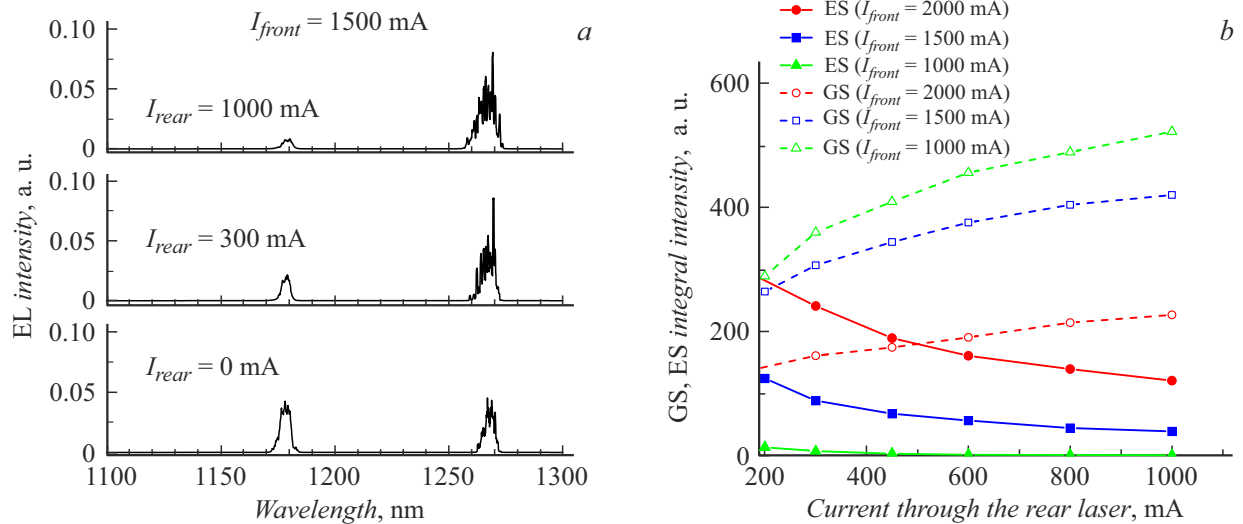


Рис. 3. *a* — спектры лазерной генерации переднего лазера длиной $850\ \mu\text{m}$ при различных токах через задний лазер. Ток переднего лазера ($I_{\text{front}} = 1500\ \text{mA}$) выше порога двухуровневой генерации. *b* — зависимости интенсивностей линий излучения GS и ES переднего лазера от тока накачки заднего лазера при различных токах через передний лазер. I_{front} и I_{rear} обозначают токи через передний и задний лазер.

I_{front} был увеличен до $1500\ \text{mA}$, что выше порога двухуровневой генерации составлявшего $590\ \text{mA}$. При отсутствии оптической инжекции ($I_{\text{rear}} = 0$) интенсивности линий генерации через GS и ES примерно равны (рис. 3, *a*). При увеличении оптической накачки (тока через задний лазер) интенсивность GS увеличивается, а интенсивность ES уменьшается. Другими словами, накачка лазера в режиме двухуровневой генерации фотонами с энергией GS подавляет генерацию через ES. Данный эффект может быть объяснен, если качественно рассмотреть зависимость заселенностей GS и ES (f_{GS} и f_{ES} соответственно) от интенсивности оптиче-

ской накачки. Инжектированные задним лазером фотоны увеличивают скорость стимулированной рекомбинации через GS в переднем лазере. В результате заселенность f_{GS} основного состояния снижается, что увеличивает скорость релаксации с ES на GS, которая пропорциональна $f_{\text{ES}}(1 - f_{\text{GS}})$. Это приводит к уменьшению f_{ES} и соответствующему снижению интенсивности лазерной генерации через ES с увеличением оптической накачки. На рис. 3, *b* показано изменение интенсивностей пиков GS и ES короткого лазера в зависимости от тока заднего лазера при нескольких значениях тока через передний лазер. Уменьшение интенсивности генерации через ES

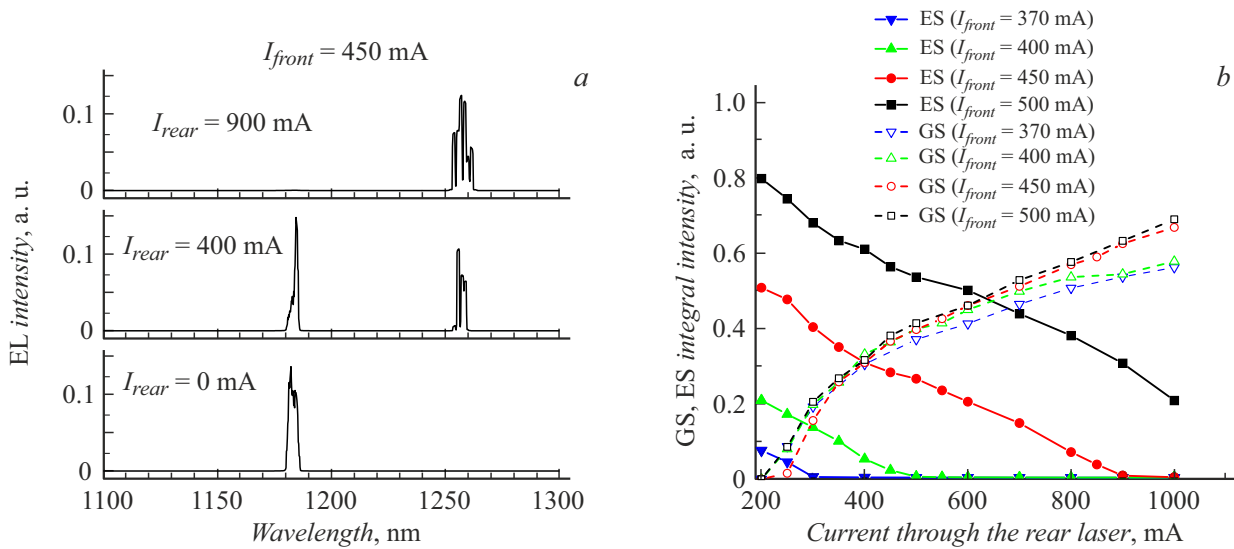


Рис. 4. *a* — спектры лазерной генерации переднего лазера длиной $750\mu\text{m}$ при различных токах через задний лазер. Передний лазер изначально находится в режиме генерации через ES, его ток составляет $I_{front} = 450$ mA. *b* — зависимости интенсивностей линий излучения GS и ES переднего лазера от тока накачки заднего лазера при различных токах через передний лазер. I_{front} и I_{rear} обозначают токи через передний и задний лазеры.

при росте уровня оптической инжекции наблюдается при всех токах накачки через передний лазер. Однако чем выше ток через передний лазер, тем большая интенсивность оптической накачки, определяемая I_{rear} , необходима для достижения требуемого уровня подавления ES. С ростом I_{rear} за счет прошедшего излучения заднего лазера увеличивается интенсивность пика GS переднего лазера.

В третьей серии экспериментов использовался передний лазер с длиной резонатора $750\mu\text{m}$, в котором генерация сразу возникала на ES с пороговым током 350 mA. При токе 450 mA через передний лазер оптическая накачка переднего лазера излучением заднего лазера с длиной волны генерации, соответствующей GS, приводит сначала к появлению в спектре пика GS, а затем к полному подавлению генерации на ES (рис. 4, *a*). Данная закономерность наблюдается при токах через передний лазер от 370 до 500 mA (рис. 4, *b*). Чем ниже ток через передний лазер, тем при меньших интенсивностях оптической инжекции происходит переключение с режима генерации на ES в режим генерации на GS. При токе 370 mA полное гашение излучения ES наблюдается почти сразу же после включения заднего лазера. При токе через короткий лазер 500 mA полное исчезновение линии ES не достигается вплоть до максимального тока через задний лазер (1000 mA). Наблюдаемые на рис. 4 эффекты можно объяснить из тех же соображений, что и уменьшение интенсивности ES при оптической накачке в случае двухуровневой генерации (рис. 3). Пик GS в спектре излучения переднего лазера, по-видимому, связан с прошедшим и усиленным излучением заднего лазера.

Таким образом, систематически исследованы эффекты переключения режимов генерации в лазерах на основе квантовых точек InAs/InGaAs/GaAs при токовой и дополнительной оптической накачке светом с длиной волны, соответствующей излучению основного состояния. Показано, что дополнительная оптическая инжекция качественно не меняет состояние лазера в режиме генерации на основном состоянии. Однако достаточно интенсивная оптическая накачка приводит к переключению лазера, находящегося в режиме генерации через возбужденное состояние или в режиме двухуровневой генерации, в режим генерации на основном состоянии. Обнаруженные эффекты могут быть использованы для имитации биологических нейронов, а простота оптической схемы делает ее легко применимой в интегральной фотонике.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-12-00358. О.И. Симчук благодарит Министерство науки и высшего образования РФ (проект FSRM-2023-0010) за поддержку при проведении тестирования эпитаксиальных пластин структурными и оптическими методами. Н.А. Калужный благодарит Министерство науки и высшего образования РФ (номер темы государственного задания FFUG-2024-0026) за поддержку исследования образцов методом сканирующей электронной микроскопии.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M.A. Nahmias, B.J. Shastri, A.N. Tait, P.R. Prucnal, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., **19** (5), 1800212 (2013). DOI: 10.1109/JSTQE.2013.2257700
- [2] P.R. Prucnal, B.J. Shastri, T.F. de Liva, M.A. Nahmias, A.N. Tait, Adv. Opt. Photon., **8** (2), 228 (2016). DOI: 10.1364/AOP.8.000228
- [3] C. Mesaritis, A. Kapsalis, A. Bogris, D. Syvridis, Sci. Rep., **6**, 39317 (2016). DOI: 10.1038/srep39317
- [4] B. Kelleher, M. Dillane, E.A. Viktorov, Light: Sci. Appl., **10**, 238 (2021). DOI: 10.1038/s41377-021-00670-y
- [5] M. Dillane, E.A. Viktorov, B. Kelleher, Opt. Lett., **48** (1), 21 (2023). DOI: 10.1364/OL.475805
- [6] Ф.И. Зубов, Ю.М. Шерняков, О.И. Симчук, Г.О. Корнышов, М.В. Максимов, Письма в ЖТФ, **50** (22), 57 (2024). DOI: 10.61011/PJTF.2024.22.59138.20049 [F.I. Zubov, Yu.M. Shernyakov, O.I. Simchuk, G.O. Kornyshev, M.V. Maximov, Tech. Phys. Lett., **50** (11), 108 (2024). DOI: 10.61011/TPL.2024.11.59680.20049].
- [7] M.V. Maximov, Yu.M. Shernyakov, N.Yu. Gordeev, V.G. Dubrovskii, A.M. Nadtochiy, A.E. Zhukov, Phys. Scripta, **98**, 125119 (2023). DOI: 10.1088/1402-4896/ad0d66
- [8] М.В. Максимов, Ю.М. Шерняков, Н.Ю. Гордеев, А.М. Надточий, А.Е. Жуков, Письма в ЖТФ, **49** (5), 18 (2023). DOI: 10.21883/PJTF.2023.05.54664.19450 [M.V. Maximov, Yu.M. Shernyakov, N.Yu. Gordeev, A.M. Nadtochiy, A.E. Zhukov, Tech. Phys. Lett., **49** (3), 15 (2023). DOI: 10.21883/TPL.2023.03.55675.19450].