

07.2;07.3;08.3

## Спектральные характеристики оптически связанной пары полосковых лазеров на квантовых точках InAs/InGaAs/GaAs

© Ф.И. Зубов<sup>1</sup>, Ю.М. Шерняков<sup>2</sup>, О.И. Симчук<sup>1</sup>, Г.О. Корнышов<sup>2</sup>, М.В. Максимов<sup>1</sup><sup>1</sup> Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет им. Ж.И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, Россия<sup>2</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: fedyazu@mail.ru

Поступило в Редакцию 3 июля 2024 г.

В окончательной редакции 14 августа 2024 г.

Принято к публикации 15 августа 2024 г.

Исследовано влияние дополнительной оптической накачки на двухуровневую генерацию лазера на основе квантовых точек InAs/InGaAs/GaAs. Накачка осуществлялась при помощи второго лазера на квантовых точках, смонтированного встык. Показано, что дополнительная оптическая инжекция на длине волны основного состояния способна переключать режимы двухуровневой генерации, а именно запускать генерацию в возбужденном состоянии или, наоборот, гасить ее в зависимости от комбинации токов через каждый из приборов.

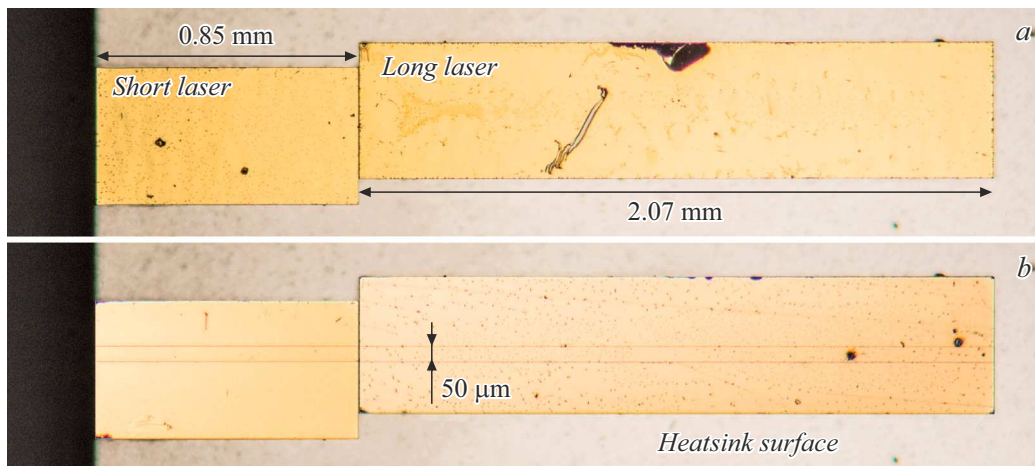
**Ключевые слова:** лазерные диоды, квантовые точки, двухуровневая генерация, оптические нейроны.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.22.59138.20049

Для решения ряда вычислительных задач чрезвычайно перспективным является способ обработки информации, аналогичный используемому биологическими нейронными сетями. Он обладает такими преимуществами, как аналого-цифровое представление сигнала, а также совмещение функций памяти и процессора. Спайковые нейронные сети, так же как и мозг, кодируют информацию в виде событий (спайков) во времени, а не в битах. Поскольку время, в которое происходит спайк, является аналоговым, а его амплитуда — цифровой, для передачи таких сигналов используется схема гибридного кодирования, в которой гибридный сигнал обладает как аналоговыми, так и цифровыми свойствами [1]. Эта стратегия кодирования обеспечивает повышенную устойчивость к шуму [2] и потенциальные улучшения с точки зрения вычислительной эффективности [3]. Оптоэлектронные устройства могут имитировать эффекты, похожие на нервную возбудимость или периодические всплески (спайки) [4], при воздействии оптической или электронной инжекции. Биологические нейроны можно разделить на два основных типа. Первый, определяемый как возбуждающий нейрон, после активации побуждает все связанные нейроны активироваться. Второй тип, определяемый как тормозной нейрон, который хотя и активируется теми же стимулирующими импульсами, что и возбуждающий нейрон, испускает импульсы, имеющие тенденцию подавлять активность во всех связанных нейронах.

Уникальной особенностью лазеров на квантовых точках (КТ) является возможность генерации в основном или возбужденном состоянии КТ, а также в двух этих состояниях одновременно [5] при относительно небольших уровнях электронной или оптической ин-

жекции. Недавно была продемонстрирована возможность создания полностью оптической нейроморфной схемы на основе полупроводниковых лазеров на КТ InAs/InGaAs/GaAs [6]. В данной работе лазер на КТ, работающий в режиме генерации через основное состояние (ground state, GS), играл роль тормозного оптического нейрона, а лазер в режиме генерации через возбужденное состояние (excited state, ES) — роль возбуждающего нейрона. Импульсы на длине волны основного состояния КТ интерпретировались как сигналы нервного возбуждения, а импульсы на длине волны возбужденного состояния — как тормозные сигналы. Было показано, что переключение между режимами генерации в лазерах на КТ под действием оптической инжекции на длинах волн либо основного, либо возбужденного состояния позволяет имитировать как возбуждающие, так и тормозные нейроны. Однако используемая в работе [6] оптическая схема была достаточно сложной и включала в себя большое количество элементов, в том числе оптический изолятор и фильтры. Необходимо также отметить, что предложенное в работе [6] соответствие между режимами генерации лазеров на КТ и оптическими нейронами не является априори единственно возможным. В частности, можно предположить, что лазер на КТ в режиме двухуровневой генерации также может быть использован в нейроморфных оптических сетях. В настоящей работе мы приводим результаты исследования переключения режимов генерации инжекционного лазера на КТ при вводе в его торец излучения непосредственно из торца другого лазера на КТ. Данная схема представляется перспективной для использования в оптических интегральных схемах ввиду своей компактности и относительной простоты.



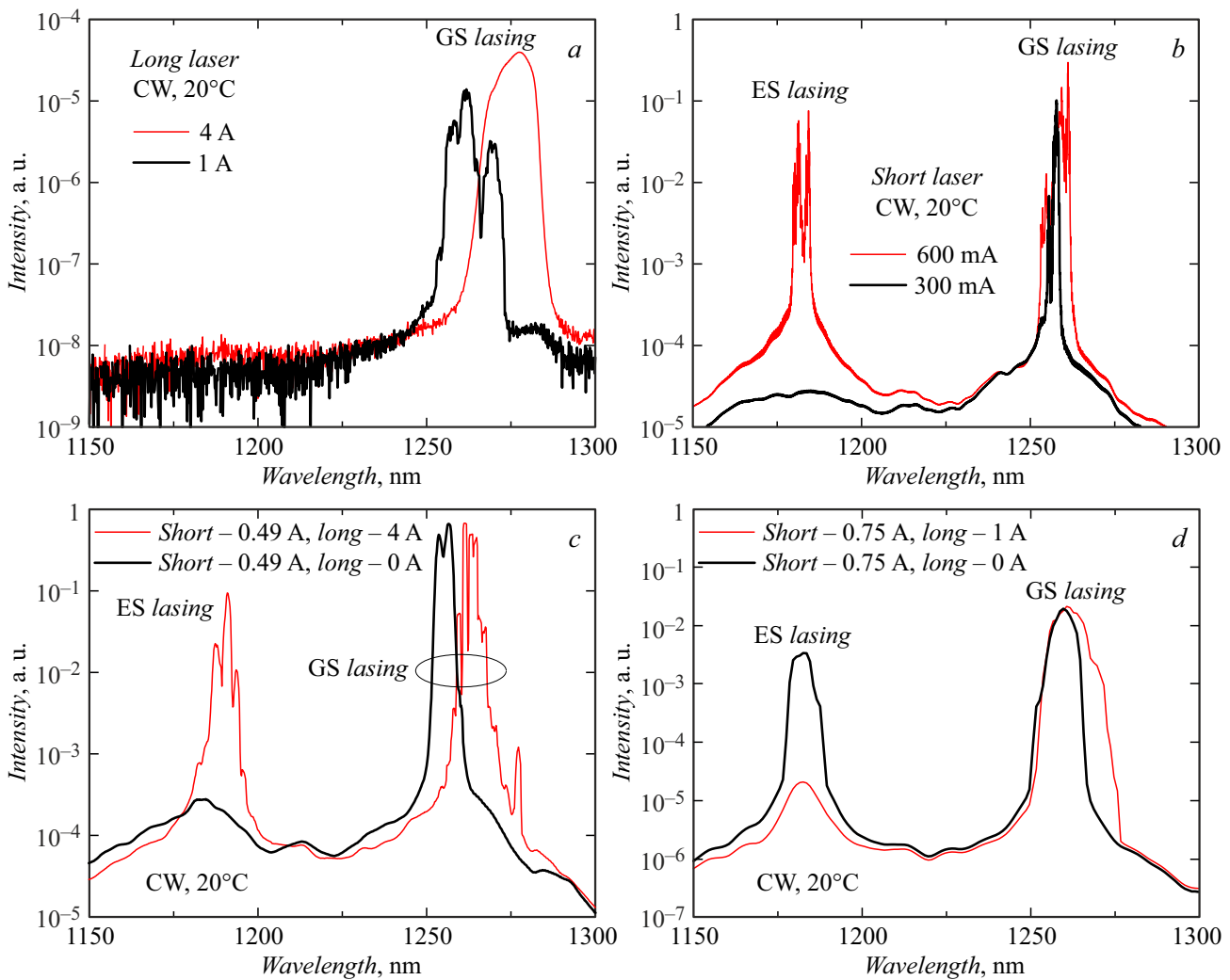
**Рис. 1.** Фотографии, сделанные при помощи оптического микроскопа. *a* — вид сверху на пару оптически связанных полосковых лазеров, смонтированных на теплоотводе, перед приваркой проволоки; *b* — на снимок, приведенный на части *a*, наложены изображения чипов, снятые с *p*-стороны до их монтажа.

Целью работы является исследование влияния дополнительной оптической накачки (оптической инъекции) на длине волны около 1260 нм на лазер, в котором генерация может происходить либо через GS (1260 нм), либо через GS и ES (1180 нм) одновременно. Лазерная гетероструктура была синтезирована методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложке  $n^+$ -GaAs (100). Активная область представляла собой десять слоев КТ InAs/InGaAs/GaAs, разделенных спейсерами GaAs толщиной 35 нм и расположенных симметрично относительно центра GaAs-волновода шириной 450 нм. Волновод был ограничен  $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ -эмиттерами  $n$ - и  $p$ -типа, каждый из которых имел толщину 1.5  $\mu\text{m}$ . КТ InAs/InGaAs/GaAs синтезировались путем зарачивания начальных трехмерных островков, полученных посредством осаждения InAs (0.8 нм) в режиме роста Странского–Крастанова, слоем  $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$  толщиной 5 нм [7]. Из гетероструктуры стандартными методами постростовой обработки кристалла были изготовлены чипы торцевых лазеров с шириной полосков 50  $\mu\text{m}$ . Резонаторы лазеров формировались путем скалывания, и диэлектрические зеркала на сколотые грани не наносились. Сначала были измерены пороги генерации в GS и ES для лазеров различной длины волны, что позволило выбрать длины чипов для последующих экспериментов. В качестве источника оптической накачки использовался лазер на КТ длиной 2.0 мм, в котором генерация в GS наблюдалась во всем исследуемом диапазоне токов инъекции. В дальнейшем будем называть этот лазер „длинным“. Накачиваемый лазер имел длину 0.85 мм, в нем генерация начинается на GS, однако при сравнительно небольшом увеличении тока инъекции возникает также генерация в ES, т. е. двухуровневая генерация [8]. В дальнейшем будем называть его „коротким“. Длинный и короткий лазеры монтировались встык с зазором между зеркалами 4  $\mu\text{m}$  (рис. 1). Позициониро-

вание и монтаж чипов на теплоотводе осуществлялись на установке Finetech Lambda 2 с высокой точностью совмещения полосков по углу и по координате (не хуже 1  $\mu\text{m}$ ) в латеральной плоскости. Малое расстояние между приборами и высокая точность их совмещения обеспечивали эффективную оптическую связь приборов. Непрерывная инъекционная накачка каждого из лазеров осуществлялась независимо. В процессе исследований температура теплоотводов составляла 20 °С. Излучение лазеров в процессе спектральных измерений собиралось линзированным оптоволоконном.

На рис. 2, *a* представлены спектры длинного лазера при токах накачки 1 и 4 А, при этом излучение собиралось непосредственно с его торца (справа на рис. 1, *a*), а ток через короткий лазер не пропускался. Мы предполагаем, что отражение от торца короткого лазера мало влияет на характеристики длинного лазера, т. е. спектры на рис. 2, *a* аналогичны спектрам одиночного длинного лазера. Пороговый ток длинного лазера составил 140 мА, генерация во всем исследованном диапазоне токов инъекции происходила исключительно в основном состоянии. При увеличении тока непрерывной накачки с 1 до 4 А наблюдается длинноволновый сдвиг пика лазерной генерации, что связано с перегревом активной области. Плотность порогового тока короткого лазера составила 430 А/см<sup>2</sup> и была выше, чем у длинного (140 А/см<sup>2</sup>), что обусловлено большими потерями на выход излучения. Пороговый ток двухуровневой генерации короткого лазера составил около 0.50 А (рис. 2, *b*).

Нами было исследовано влияние дополнительной оптической накачки при помощи длинного лазера на переключение режимов двухуровневой генерации короткого лазера. При этом сбор излучения осуществлялся с торца короткого лазера (слева на рис. 1, *a*). Мы предполагаем, что излучение короткого лазера мало влияло на режимы работы длинного лазера, поскольку порог двухуровневой



**Рис. 2.** Спектры электролюминесценции длинного лазера в случае, когда ток через короткий лазер не пропускался (*a*), и короткого лазера в случае, когда ток через длинный лазер не пропускался (*b*). В обоих случаях (*a* и *b*) сбор излучения осуществлялся непосредственно с торца накачиваемого лазера. Спектры излучения короткого лазера при его оптической накачке длинным лазером: *c* — возникновение генерации в ES, *d* — подавление генерации на ES. На каждом графике указаны токи инжекции через длинный (*long*) и короткий (*short*) лазеры.

генерации в длинном лазере был очень высок. Было обнаружено два типа переключений режимов генерации в коротком лазере. Пример переключения первого типа представлен на рис. 2, *c*. Изначально короткий лазер находился в состоянии чуть ниже порога двухуровневой генерации. При этом интенсивность излучения через ES была значительно меньше, чем через GS. При включении длинного лазера наблюдается значительное усиление интенсивности генерации через ES в коротком лазере, генерация через GS сохраняется, но центр ее пика смещается приблизительно на 10 nm в длинноволновую область. Длинноволновый сдвиг излучения короткого лазера, по-видимому, связан с передачей тепла от длинного лазера, работающего при высоком непрерывном токе накачки, в 28 раз превышающем пороговый, и расположенного в непосредственной близости от короткого. Дополнительным фактором может служить разогрев

активной области короткого лазера за счет дополнительной оптической накачки. Данный тип переключения (рис. 2, *c*) происходит лишь при достаточно интенсивном излучении длинного лазера (при токе через него более 2 A). Такое поведение короткого лазера может быть использовано для имитации тормозного оптического нейрона.

Пример переключения второго типа продемонстрирован на рис. 2, *d*. Исходно короткий лазер находился в режиме двухуровневой генерации, интенсивность пика ES была достаточно велика. Увеличение интенсивности излучения ES короткого лазера по сравнению с предыдущим экспериментом (рис. 2, *c*) достигалось увеличением тока накачки. При включении длинного лазера наблюдается гашение генерации в ES в коротком лазере, а также уширение пика основного состояния с 7 до 10 nm по ширине на половине высоты, кото-

рое, по-видимому, обусловлено увеличением числа КТ, находящихся в режиме генерации, за счет роста комбинированной (инжекционной и оптической) накачки. Подавление генерации в ЕС в коротком лазере за счет воздействия на него излучением на длине волны GS другого лазера может быть использовано для имитации поведения возбуждающего оптического нейрона. Таким образом, короткий лазер может служить оптическим аналогом тормозного или возбуждающего нейрона в зависимости от тока через него.

Итак, создана и исследована оптически связанная пара полосковых лазеров разных длин на КТ InAs/InGaAs/GaAs. В зависимости от токов через лазеры наблюдаются эффекты возбуждения и гашения генерации в ЕС в коротком лазере за счет его оптической накачки длинным лазером, что может служить имитацией поведения тормозного и возбуждающего оптических нейронов соответственно. Простота и компактность конструкции исследованной оптической пары лазеров делают ее перспективной для реализации вычислительных нейроморфных фотонных интегральных схем.

### 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 исследования поверхностных дефектов образцов методами темнопольной и светлопольной спектроскопии.

### 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.2013.225770
- [2] A.N. Tait, M.A. Nahmias, Y. Tian, B.J. Shastri, P.R. Prucnal, in *Nanophotonic information physics*, ed. by M. Naruse (Springer, Berlin–Heidelberg, 2014), p. 183–222. DOI: 10.1007/978-3-642-40224-1\_8
- [3] J. Hasler, B. Marr, Front Neurosci., **10**, 7 (2013). DOI: 10.3389/fnins.2013.00118
- [4] P.R. Prucnal, B.J. Shastri, T.F. de Liva, M.A. Nahmias, A.N. Tait, Adv. Opt. Photon., **8** (2), 230 (2016). DOI: 10.1364/AOP.8.000228
- [5] A. Markus, J.X. Chen, C. Paranthoën, A. Fiore, C. Platz, O. Gauthier-Lafaye, Appl. Phys. Lett., **82** (12), 1818 (2003). DOI: 10.1063/1.1563742
- [6] C. Mesaritakis, A. Kapsalis, A. Bogris, D. Syvridis, Sci. Rep., **6**, 39317 (2016). DOI: 10.1038/srep39317
- [7] M.V. Maximov, A.F. Tsatsul'nikov, B.V. Volovik, D.S. Sizov, Yu.M. Shernyakov, I.N. Kaiander, A.E. Zhukov, A.R. Kovsh, S.S. Mikhri, V.M. Ustinov, Zh.I. Alferov, R. Heitz, V.A. Shchukin, N.N. Ledentsov, D. Bimberg, Yu.G. Musikhin, W. Neumann, Phys. Rev. B, **62** (24), 16671 (2000). DOI: 10.1103/PhysRevB.62.16671
- [8] M.V. Maximov, Yu.M. Shernyakov, N.Yu. Gordeev, V.G. Dubrovskii, A.M. Nadtochiy, A.E. Zhukov, Phys. Scripta, **98** (12), 125119 (2023). DOI: 10.1088/1402-4896/ad0d66