

Исследование переключения частоты генерации в микродисковых лазерах с квантовыми точками для высокоскоростной передачи данных

Известно, что производительность вычислительных систем росла до недавнего времени гигантскими темпами, хотя и неравномерно для разных компонентов фон-Неймановской архитектуры. Однако известно также, что потребности авторов и пользователей программного обеспечения растут ещё быстрее. Базовым аппаратным показателем скорости вычислений является частота модуляции электрического сигнала, привязанная к тактовой частоте. Можно заметить, что тактовая частота процессоров не растёт уже более десяти лет и ограничена величиной в несколько ГГц; весь недавний рост производительности вызван совершенствованием архитектуры компьютеров. Данное ограничение вызвано фундаментальными физическими причинами: насыщением скорости носителей заряда в полупроводниковых материалах при росте частоты, перегревом среды и помехами. С другой стороны, световой сигнал, в отличие от электронного, допускает гораздо более высокую частоту модуляции и лишён перечисленных недостатков. Это его свойство уже используется для передачи данных за пределами интегральных схем по оптоволокну на средние и большие расстояния. Однако для такой передачи данных почти повсеместно используются вертикально-излучающие лазеры (VCSEL), дорогие в изготовлении, крупные по меркам современных чипов и не приспособленные для интеграции с другими компонентами. Поэтому в настоящее время идёт активный поиск источников излучения, способных послужить фундаментом будущих фотонных интегральных схем для нужд вычислительной техники.

Одним из таких перспективных источников являются микродисковые и микрокольцевые лазеры на квантовых точках. Микродисковые резонаторы поддерживают моды шепчущей галереи, отличающиеся высокой добротностью, что ведёт к очень низким необходимым пороговым токам. Квантовые точки обладают высокой температурной стабильностью усиления, а также способны излучать на нескольких дискретных длинах волн, что будет важно в данном докладе. В таких микролазерах были продемонстрированы низкие рабочие токи (порядка 1 мА) [1], высокие скорости модуляции (до 7 ГГц) [2], работа при повышенных температурах (более 100°) [3]. Кроме того, они излучают в плоскости подложки, на которой изготовлены и могут быть смонтированы на кремниевую фотонную интегральную схему [4]. В дальнейшем скорость модуляции может быть повышена, однако возможно увеличить эффективность использования таких микролазеров, если использовать возможность одновременной генерации на двух длинах волн. Поскольку квантовые точки имеют, вообще говоря, несколько локализованных квантовых состояний, между которыми возможны оптические переходы на различных длинах волн, лазерная генерация также может идти на различных длинах волн в зависимости от заполнения состояний носителями и потерь в системе. Варьировать эти параметры можно изменением тока накачки, температуры (динамически) и геометрии резонатора (статически). Долгое время такая генерация наблюдалась лишь в лазерах полосковой конструкции [5], и только недавно авторам настоящего доклада удалось продемонстрировать двухуровневую генерацию в микродисковых лазерах. Явление многоуровневой генерации удобно рассмотреть с точки зрения поведения системы при росте тока накачки. Как правило, порог генерации на основном состоянии (с наибольшей длиной волны)

наименьший, следовательно, генерация прежде всего возникает на этом состоянии. При дальнейшем росте тока накачки из-за ряда причин концентрация носителей не стабилизируется, как должно было бы быть в идеальном случае, а продолжает расти, что приводит к заполнению возбуждённого квантового состояния. В результате достигается порог одновременной генерации, когда в спектре излучения присутствуют одновременно две длины волны. При последующем росте тока возрастают оптические потери на свободных носителях, что приводит к прекращению генерации на основном состоянии, в то время как генерация на возбуждённом состоянии продолжается благодаря более высокой вероятности оптического перехода и, как следствие, более высокому насыщенному усилению. Таким образом, при росте тока накачки последовательно реализуются четыре состояния излучения: излучение отсутствует, излучение идёт на длине волны основного перехода, излучение идёт на длинах волн основного и возбуждённого перехода, излучение идёт только на длине волны возбуждённого перехода. Эти четыре состояния могут кодировать двоичные последовательности 00, 01, 10, 11, что и приводит к повышению пропускной способности фотонной схемы. Помимо этого, микролазеры с двухуровневой генерацией можно использовать и для создания перспективных нейроморфных сетей для решения задач искусственного интеллекта [6] и создания кубитов [7].

В нашей работе исследованы условия возникновения генерации на различных состояниях в микродисковых лазерах различного диаметра и при различной температуре. Кроме того, затронута тема генерации в резонаторах формы «стадиона» (racetrack). Направление этих исследований обусловлено тем, что, как указывалось, генерация на той или иной длине волны зависит от оптических потерь в резонаторе, а в микродисковых резонаторах потери зависят от концентрации свободных носителей и времён жизни локализованных носителей, которые в свою очередь зависят от температуры, а также от диаметра микродиска и его модового состава (в случае модификации формы). Новизна работы – в том, что влияние этих факторов на двухуровневую генерацию исследовано впервые.

Объектом исследования выступили наноструктуры, изготовленные методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложке арсенида галлия. Активная область содержала 10 слоев самоорганизованных квантовых точек $\text{InAs}/\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$, заключенных между широкозонными обкладками $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ n - и p -типов с градиентом состава (толщины 2500 нм и 2200 нм, соответственно), формирующими волновод и служащими для инжекции заряда в активную область. Сами микрорезонаторы были сформированы путём фотолитографии и плазмохимического травления, высота резонаторов в результате составила порядка 6 мкм. Были подготовлены микродиски диаметрами от 9 до 30 мкм, а также racetrack-микрорезонатор. С обеих сторон структуры были сформированы металлические контакты. При помощи сканирующей электронной микроскопии осуществлён контроль изготовленных микрорезонаторов, проведено точное измерение их диаметров (см. рис. 1). Образцы были напаяны на теплоотвод, который был затем смонтирован на медный держатель с контроллером и датчиком температуры. Для исследования отдельных микролазеров использовался токопроводящий зонд, позволявший подавать напряжение смещения в непрерывном и импульсном режиме на любой выбранный микролазер. Излучение также собиралось адресно с помощью микрообъектива, затем через оптоволокно направлялось в монохроматор и далее на ПЗС-матрицу для детектирования. Первым исследованием стало измерение вольт-амперных характеристик лазеров, в результате чего найдено, что напряжение отсечки составило 1.18 В для всех измеренных лазеров, а

последовательное сопротивление обратно пропорционально квадрату диаметра, что позволило оценить удельное последовательное сопротивление как $1.47 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$.

Далее были измерены спектры спонтанной электролюминесценции в части структуры, не подвергнутой травлению. Это дало возможность получить собственный спектр излучения квантовых точек, не связанный с модами микродискового резонатора. В результате было установлено, что в спектре присутствуют четыре линии (основное – GS – и три возбуждённых – ES1-3 – состояния), которые достаточно хорошо разрешены; полученные спектры позволили в дальнейшем определить, к какому из состояний квантовых точек принадлежит та или иная линия излучения в различных микролазерах (см. рис. 2а).

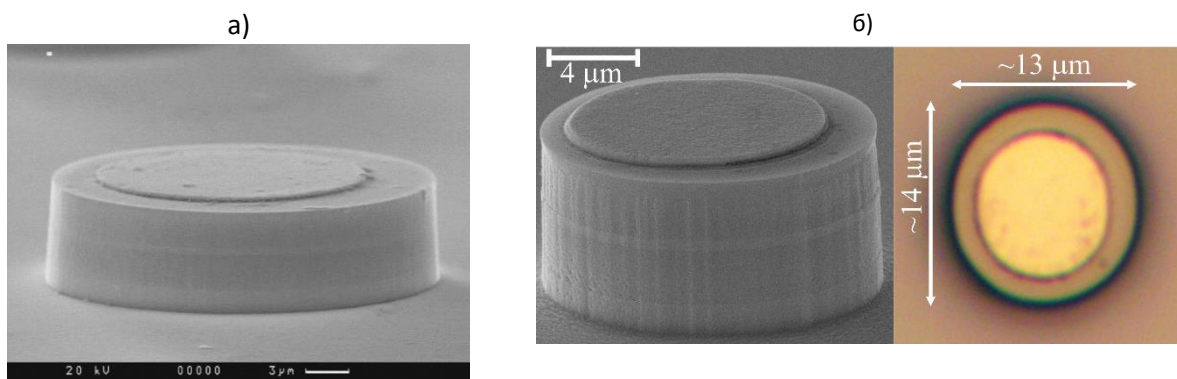


Рис. 1. Микрофотографии дискового лазера диаметром 28 мкм (а) и racetrack-лазера (б).

Далее, в режиме импульсной накачки были измерены спектры электролюминесценции микродисковых лазеров. Измерения показали несколько особенностей: во-первых, для микролазера наибольшего диаметра 28 мкм генерация осуществляется исключительно на основном состоянии. Для дисков меньшего диаметра возможна как генерация на основном, так и на первом возбуждённом состоянии (рис. 2б). Наконец, для диска наименьшего диаметра 9 мкм генерация возможна на первом и втором возбуждённом состоянии (но не на основном, рис. 2в). Отметим, что для всех дисковых лазеров генерация идёт на соседних состояниях. В то же время, для racetrack-лазера генерация идёт на основном и/или втором возбуждённом состоянии, т.е. первое возбуждённое состояние пропускается (см. рис. 2г). Такое различное поведение вызвано тем, что при увеличении диаметра микродиска уменьшаются оптические потери. Таким образом, при высоком уровне потерь предпочтительнее генерация через более высокоэнергетические (коротковолновые состояния). При этом в racetrack-микрорезонаторе имеется модифицированный спектр, в котором, вообще говоря, потери на различных спектральных участках могут быть неравномерны. Таким образом, в нём невозможна генерация на первом возбуждённом состоянии.

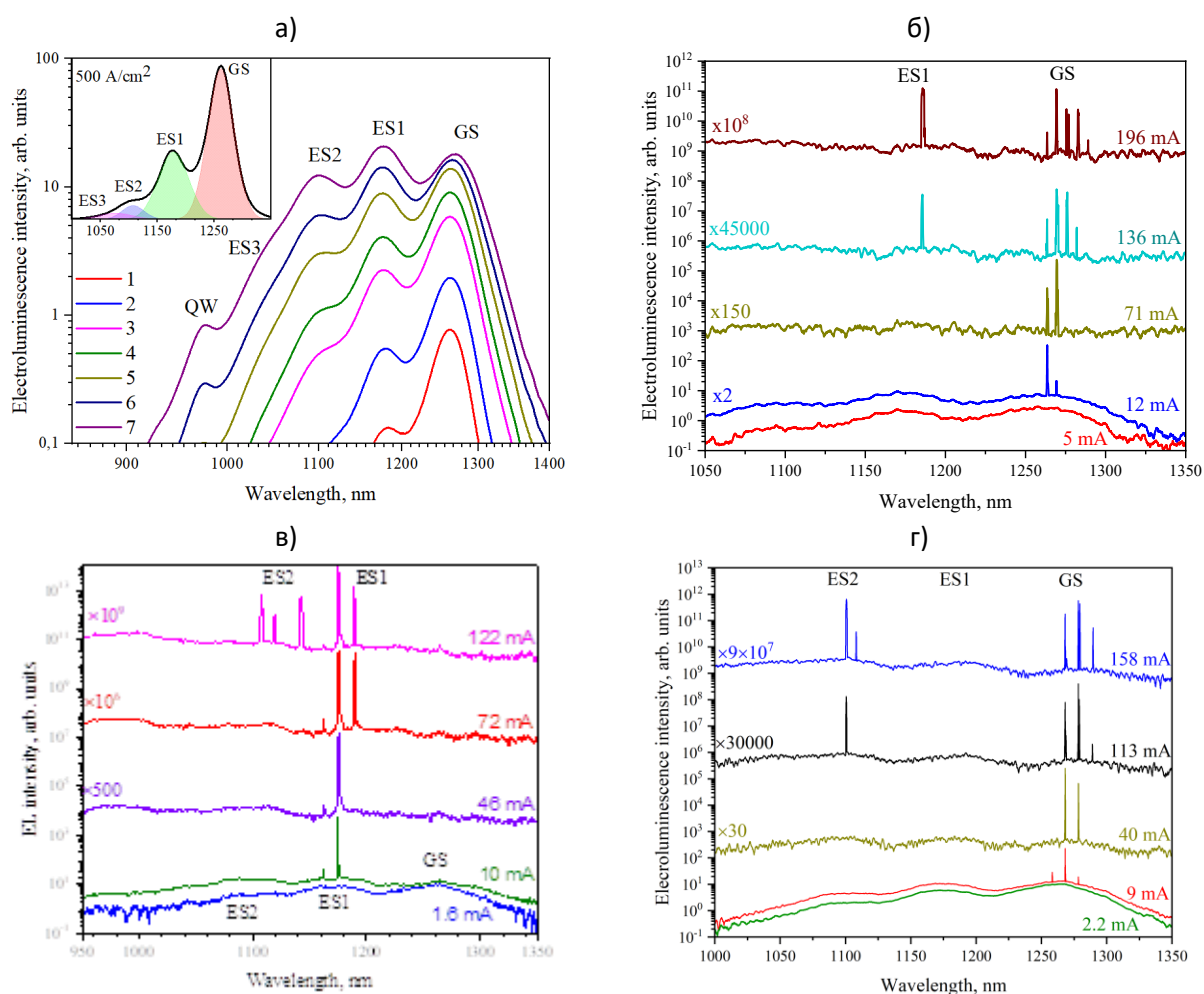


Рис. 2. Спектры спонтанной электролюминесценции квантовых точек (а) и электролюминесценции дисков диаметром 20 мкм (б) и 9 мкм (в), а также racetrack-лазера (г) при различной накачке.

Далее были измерены и температурные зависимости генерации для микродисковых лазеров, представленные на рис. 3а. Основным свойством этих зависимостей является то, что при небольших температурах реализуются описанные выше четыре режима генерации (все комбинации двух длин волн), в то время как при повышенной температуре генерация идёт только на возбуждённом состоянии. Данный эффект был прояснён моделированием, выполненным с помощью решения системы скоростных уравнений, в которые были введены оптические потери на свободных носителях, растущие, как известно, с температурой. Согласие моделирования с экспериментальными результатами подтверждает правильность предположения о том, что управление потерями позволяет реализовывать различные режимы генерации. Кроме того, полученная модель позволила получить линейную аппроксимацию критической температуры (выше которой невозможна одновременная генерация) как функцию насыщенного усиления квантовых точек и внутренних потерь в резонаторе. В свою очередь, насыщенное усиление может

быть получено из отдельного эксперимента для лазеров с полосковым резонатором различной длины, вытравленных из той же эпитаксиальной структуры.

Кроме того, также при помощи решения скоростных уравнений было проведено моделирование динамического поведения микролазеров при переключении величины тока накачки. Как показывает рис. 3б, вполне достижима частота модуляции 1 ГГц.

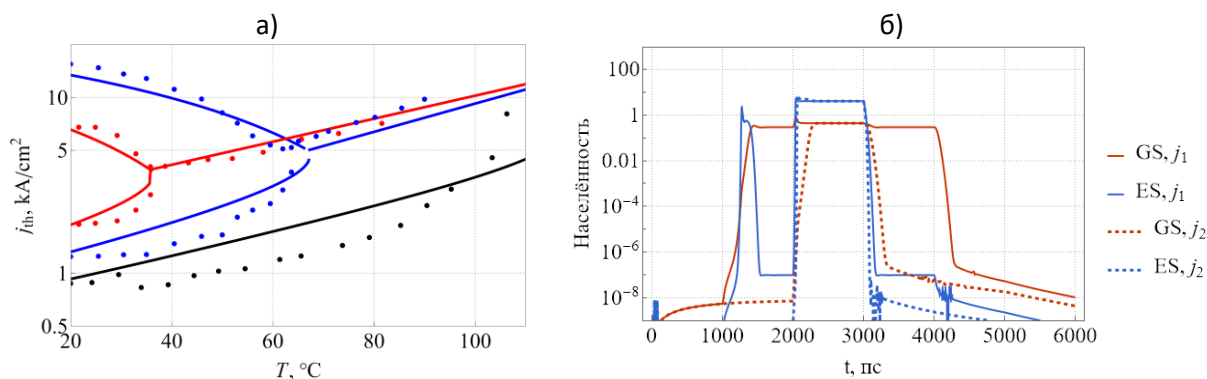


Рис. 3. (а) Точки – экспериментальные значения пороговых плотностей тока для микролазеров диаметром 28 мкм (чёрные), 24 мкм (синие) и 20 мкм (красные). Верхняя или единственная для данной температуры точка соответствует порогу генерации на возбуждённом состоянии, нижняя (при наличии двух точек) – генерации на основном состоянии. Сплошные кривые – результаты моделирования. (б) Зависимость населённостей фотонных состояний от времени при модуляции тока накачки по схеме «отсутствие генерации (NG)» – «генерация на основном состоянии (GS)» – «генерация на основном и возбуждённых состояниях (GS+ES)» и обратно (сплошные линии) и «NG» – «GS+ES» и обратно (пунктирные линии).

Итак, проведённая работа позволила впервые наблюдать генерацию на двух возбуждённых состояниях в микролазере на квантовых точках, а также генерацию с перескоком одного состояния в gasetrack-лазерах. Также была изучена температурная эволюция порогов генерации и получена эмпирическая формула для критической температуры. Следует отметить, что все исследуемые лазеры изготовлены в рамках одного технологического процесса и расположены на одной подложке; при этом они имеют различный спектр излучения и различные зависимости этого спектра от тока. В дальнейшем это позволит создавать компактные фотонные интегральные схемы высокой степени сложности.

1. Moiseev E.I., Kryzhanovskaya N.V., Zubov F.I., Mikhailovskii M.S., Abramov A.N., Maximov M.V., Kulagina M.M., Guseva Yu.A., Livshits D.A., Zhukov A.E. Record low threshold current density in quantum dot microdisk laser // Semiconductors – 2019. – Vol. 53, No. 14. – P. 1888 – 1890.

2. Wan Y., Inoue D., Jung D., Norman J.C., Shang C., Gossard A.C., Bowers J.E. Directly modulated quantum dot lasers on silicon with a milliampere threshold and high temperature stability // Photonics Research – 2018. – Vol. 6, No. 8. – P. 776 - 781.

3. Kryzhanovskaya N.V., Moiseev E.I., Kudashova Yu.V., Zubov F.I., Lipovskii A.A., Kulagina M.M., Troshkov S.I., Zadiranov Yu.M., Lifshits D.A., Maximov M.V., Zhukov A.E. Continuous-wave lasing at 100°C in 1.3 μm quantum dot microdisk diode laser // *Electronics Letters* – 2015 . - Vol. 51, No. 17 . – P. 1354 - 1355 .
4. Zhukov A.E., Kryzhanovskaya N.V., Moiseev E.I., Dragunova A.S., Tang M., Chen S., Liu H., Kulagina M.M., Kadinskaya S.A., Zubov F.I., Mozharov A.M., Maximov M.V. InAs/GaAs quantum dot microlasers formed on silicon using monolithic and hybrid integration methods // *Materials* – 2020 . – Vol. 13, No. 10 . – P. 2315.
5. Markus A., Chen J.X., Paranthoën C. Simultaneous two-state lasing in quantum-dot lasers // *Applied Physics Letters* – 2003 . – Vol. 82, No. 12 . – P. 1818 – 1820.
6. Peng H.T., Nahmias M.A., Ferreira de Lima T., Tait A.N., Shastri B.J. Neuromorphic photonic integrated circuits // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* – 2018 . – Vol. 24, No. 6 . – P. 6101715.
7. Zhang X., Li H.-O., Wang K., Cao G., Xiao M., Gou G.-P. Qubits based on semiconductor quantum dots // *Chinese Physics B* – 2018 . – Vol. 27, No. 2 . – P. 020305.