07

Высокочастотная модуляция микрокольцевого лазера с квантовыми точками при повышенной температуре

© А.Е. Жуков[1], Э.И. Моисеев[1], И.С. Махов[1], И.С. Федосов[1], Ф.И. Зубов[2], А.М. Можаров[2], К.А. Иванов[1], А.М. Надточий[1], Н.В. Крыжановская[1]

[1] Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“, Санкт-Петербург, Россия
[2] Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет им. Ж.И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: zhukale@gmail.com

Поступило в Редакцию 10 июня 2025 г.
В окончательной редакции 14 июля 2025 г.
Принято к публикации 15 июля 2025 г.

Исследованы динамические характеристики микрокольцевого лазера с квантовыми точками InGaAs/GaAs с помощью малосигнальной высокочастотной токовой модуляции при 55 °C. Наибольшее значение полосы модуляции составило 3.7 GHz, энергозатраты при оптической передаче оценены в 4.2–6.4 pJ/bit. Также определены температурные зависимости параметров, влияющих на быстродействие (*K*-фактор, пороговый ток, эффективность токовой модуляции).

Ключевые слова: высокочастотная модуляция, микролазер, квантовые точки.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.20.61399.20402

Микродисковые/микрокольцевые резонаторы на основе квантовых точек (КТ) перспективны для создания компактных лазерных диодов, в том числе для их интеграции с кремниевой электроникой [1,2]. Одним из перспективных применений является их использование для оптической передачи данных на чипе, что предъявляет достаточно высокие требования к их способности работать с высокой скоростью. В работе [3] для микрокольцевого лазера диаметром 50 μm с КТ InAs была продемонстрирована при комнатной температуре полоса модуляции (по уровню -3 dB) 6.5 GHz при эффективности модуляции 0.38 GHz/mA$^{1/2}$, а также оптическая передача данных со скоростью 10 Gb/s. Близкие значения были получены при комнатной температуре для микродискового лазера диаметром 23 μm на основе КТ InGaAs [4]: полоса модуляции 6.7 GHz, скорость передачи данных 12.5 Gb/s. В работе [5] для микрокольцевого лазера диаметром 50 μm с КТ InAs наибольшая частота модуляции на уровне -3 dB составила 7.5 GHz при токе смещения 22 mA, а оптическая передача была реализована со скоростью 15 Gb/s.

В связи с тем, что для оптоэлектронных приборов, интегрированных с кремниевой электроникой, предполагается работа при повышенных температурах, важным является сохранение работоспособности и в этом режиме. В то время как полосковые лазеры с КТ уже достаточно давно показали способность передачи данных на высоких скоростях в температурном диапазоне по крайней мере до 85 °C [6], для дисковых/кольцевых микролазеров с КТ исследования быстродействия при повышенных температурах отсутствуют, хотя при непрерывной накачке такие микролазеры и демонстрировали лазерную генерацию при температурах свыше 100 °C [7]. В настоящей работе исследованы высокочастотные характеристики микрокольцевого лазера с КТ InGaAs при 55 °C и показано, что ширина полосы модуляции по уровню -3 dB превышает 2 GHz в широком диапазоне токов прямого смещения, эффективность модуляции вблизи порога составила 1.5 GHz/mA$^{1/2}$, а максимальное значение полосы модуляции приближается к 4 GHz.

Лазерная гетероструктура была выращена методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений низкого давления на подложке n^+-GaAs, разориентированной на 6° от плоскости (100). Активная область содержала пять рядов КТ, сформированных осаждением восьми монослоев $In_{0.4}Ga_{0.6}As$ [8], отделенных друг от друга прослойками GaAs (40 nm) и помещенных в середину волновода GaAs толщиной 0.8 μm, ограниченного эмиттерами $Al_{0.34}Ga_{0.66}As$. Кольцевые резонаторы с внешним/внутренним диаметром 20/6 μm были изготовлены с помощью фотолитографии и сухого травления на глубину 5 μm (см. вставку к рис. 1). Кольцевой *p*-контакт к верхнему слою p^+-GaAs был сформирован с помощью металлизации AgMn/Ni/Au. Затем микрокольца были планаризованы эпоксидным резистом SU8, поверх которого были изготовлены золотые контактные площадки размером 50×90 μm для подсоединения контактной золотой проволоки толщиной 50 μm. Со стороны подложки был изготовлен сплошной *n*-контакт AuGe/Ni/Au. Выколотый чип с микролазером был напаян подложкой вниз на держатель, размещенный на медном теплоотводе.

Излучение собиралось в боковом направлении с помощью соединенного с оптоволокном длиннофокусного объектива $\times 20$ Mitutoyo NIR с числовой апертурой 0.4. В статическом режиме с помощью спектрального анализатора AQ6370C Yokogawa регистрировались спектры излучения (спектральное разрешение 0.2 nm). Порого-

вый ток при 55 °C составил 8.6 mA. Лазерная генерация происходила на длине волны 1105 nm. Спектр имел квазиодночастотный характер: при накачке, равной двум пороговым токам, коэффициент подавления боковых мод составил 25 dB. Динамические характеристики исследовались в частотном диапазоне до 20 GHz с помощью быстродействующего детектора (New Focus 1434 25 GHz) и анализатора цепей (Agilent E8364B). Для накачки использовался высокочастотный зонд типа земля–сигнал–земля (GSG). Через высокочастотный тройник подавался сигнал модуляции с некоторой частотой f, а также постоянный ток прямого смещения I, задаваемый источником-измерителем Keithley 2401. Измерения амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) были выполнены при различных токах смещения, одновременно проводилось измерение падения напряжения на лазерном диоде. Температура держателя поддерживалась равной 55 °C с помощью резистивного нагревателя с обратной связью.

На рис. 1 приведены АЧХ, измеренные при 55 °C при двух различных токах прямого смещения. В исследованном диапазоне токов (от порогового тока и вплоть до 23 mA) релаксационные колебания остаются не полностью демпфированными, о чем свидетельствует выраженный резонансный пик. Экспериментальные данные были использованы для оценки ширины полосы модуляции, под которой понимается частота $f_{3\,\mathrm{dB}}$, при которой отклик спадает на -3 dB относительно своего низкочастотного значения. Как видно, при 55 °C полоса модуляции превосходит 2 GHz в широком диапазоне токов смещения (рис. 2). Вблизи порогового тока I_{th} частота $f_{3\,\mathrm{dB}}$ может быть аппроксимирована функцией вида $f_{3\,\mathrm{dB}} = \mathrm{MCEF}\sqrt{I - I_{th}}$, где MCEF — коэффициент, описывающий эффективность токовой модуляции (modulation current efficiency factor [9]), был определен

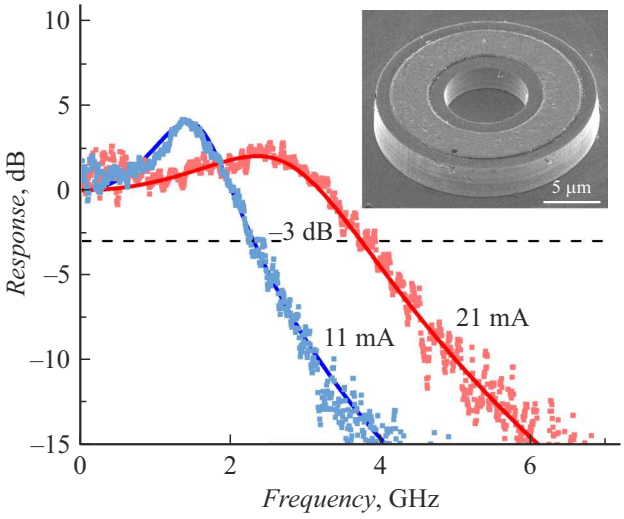


Рис. 1. АЧХ при 55 °C для различных значений постоянного тока. Символы — эксперимент, линия — аппроксимация выражением (1). На вставке — микрофотография кольцевого резонатора с верхним контактом до планаризации.

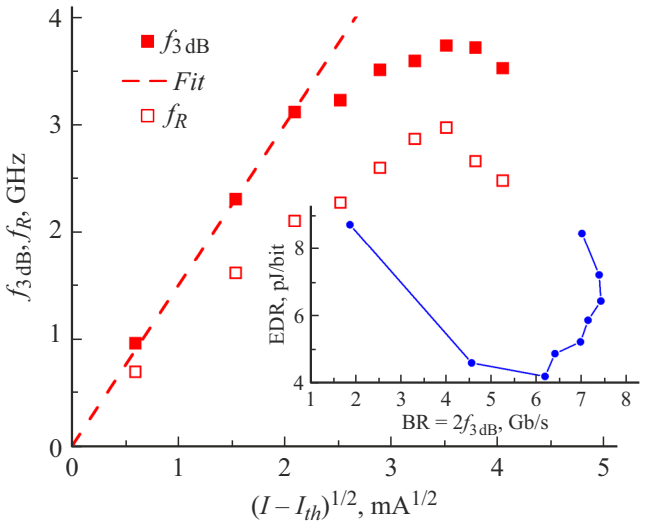


Рис. 2. Зависимость полосы модуляции (закрашенные символы) и частоты релаксационных колебаний (незакрашенные символы) от тока прямого смещения при 55 °C. Линия соответствует эффективности модуляции 1.5 GHz/mA$^{1/2}$. На вставке — рассчитанное соотношение между скоростью передачи данных и энергозатратами.

равным 1.5 GHz/mA$^{1/2}$. При дальнейшем увеличении тока смещения рост полосы модуляции замедляется, а затем происходит снижение $f_{3\,\mathrm{dB}}$. Наибольшая ширина полосы модуляции составила 3.73 GHz (при токе 21 mA). Скорость безошибочной оптической передачи данных BR пропорциональна частоте $f_{3\,\mathrm{dB}}$: $\mathrm{BR} = M f_{3\,\mathrm{dB}}$, где коэффициент M приблизительно равен 2. Так, в работе [4] для микродискового лазера этот коэффициент составил $12.5/6.7 = 1.87$, а в [10] для быстродействующих вертикально-излучающих лазеров сообщались значения M в диапазоне от 1.7 до 2.46. С учетом этого можно полагать, что микрокольцевые лазеры с квантовыми точками позволят реализовать передачу данных при повышенной до 55 °C температуре со скоростью около 7 Gb/s. Энергия, потребляемая для передачи одного бита (energy to data ratio, EDR), была рассчитана как $\mathrm{EDR} = \frac{UI}{\mathrm{BR}}$, где I — ток прямого смещения, U — соответствующее ему электрическое напряжение, $\mathrm{BR} = 2f_{3\,\mathrm{dB}}$ — ожидаемая скорость передачи данных при M, равном 2. Соотношение между EDR и BR приведено на вставке к рис. 2. Наименьшее энергопотребление оценено как 4.2 pJ/bit при скорости 6.2 Gb/s, тогда как наибольшему быстродействию 7.5 Gb/s соответствует EDR = 6.4 pJ/bit.

Экспериментальные кривые малосигнальной модуляции были аппроксимированы с использованием выражения, которое следует из анализа скоростных уравнений [11]:

$$A(f) = \frac{f_R^4}{(f_R^2 - f^2)^2 + f^2\left(\frac{\gamma}{2\pi}\right)^2} \frac{1}{1 + \frac{f^2}{f_p^2}}. \qquad (1)$$

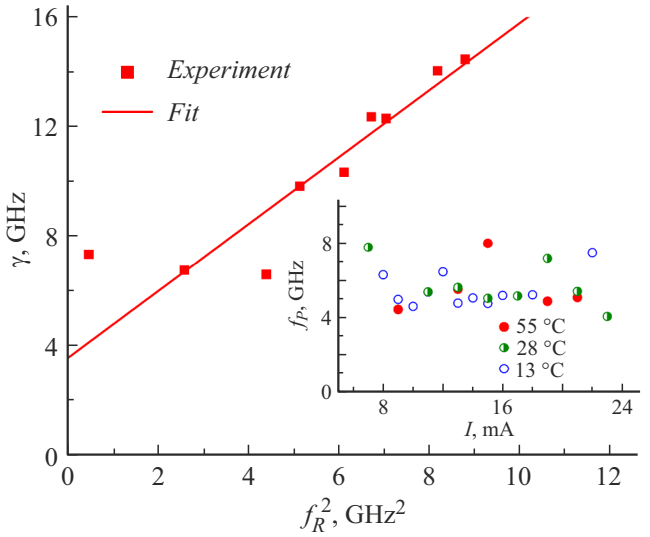


Рис. 3. Взаимосвязь частоты и коэффициента затухания релаксационных колебаний (символы) при 55 °C и аппроксимация для $K = 1.2$ ns, $\gamma_0 = 3.5$ GHz. На вставке — паразитная частота отсечки в зависимости от тока прямого смещения при различных температурах.

В результате для каждой рабочей точки были найдены параметры, определяющие быстродействие лазера: частота релаксационных колебаний (f_R) и коэффициент затухания релаксационных колебаний (γ), а также паразитная частота отсечки (f_P). Последняя, как было обнаружено, не демонстрирует регулярной зависимости ни от тока смещения, ни от температуры (вставка к рис. 3). Среднее значение и среднеквадратическое отклонение, определенные при 13, 28 и 55 °C, составляют 5.4 ± 0.9, 5.7 ± 1.1 и 5.6 ± 1.2 GHz соответственно. Мы связываем паразитную отсечку с перезарядкой емкости микролазера. То обстоятельство, что при 55 °C полоса модуляции оказывается ниже частоты отсечки f_P, свидетельствует о том, что на величину $f_{3\,\mathrm{dB}}$ оказывают влияние другие механизмы ограничения быстродействия.

На рис. 3 приведены зависимость коэффициента демпфирования релаксационных колебаний от частоты релаксационных колебаний и аппроксимация зависимости выражением [11]: $\gamma = Kf_R^2 + \gamma_0$. K-фактор был оценен равным 1.2 ns, низкочастотная компонента коэффициента затухания, обусловленная конечным временем жизни носителей заряда, $\gamma_0 = 3.5$ GHz. Максимальную ширину полосы модуляции $f_{\max}$, ограниченную демпфированием релаксационных колебаний, можно получить из выражения (1) в пределе $f_P \to \infty$, полагая $A = 1/2$. Значение $f_{\max}$ является сложной функцией параметров K и γ_0 [12], которая в случае малости $K\gamma_0/(4\pi^2)$ упрощается к выражению $f_{\max} \approx \frac{2\sqrt{2}\pi}{K} - \frac{\gamma_0}{2\sqrt{2}\pi}$. Для определенных нами значений параметров $f_{\max}$ составляет 6.8 GHz. Таким образом, внутреннее предельное быстродействие почти в 2 раза превосходит экспериментально определенное наибольшее значение частоты $f_{3\,\mathrm{dB}}$.

На рис. 2 показана зависимость от тока частоты релаксационных колебаний f_R, извлеченной из аппроксимации АЧХ выражением (1). Как видно, поведение f_R и $f_{3\,\mathrm{dB}}$ качественно совпадает. В частности, рост частоты релаксационных колебаний при увеличении тока постепенно замедляется, f_R достигает своего наибольшего значения при том же токе, что и полоса модуляции, после чего спадает. Так как сама по себе частота релаксационных колебаний не подвержена влиянию ни коэффициента демпфирования, ни емкости прибора, подобное поведение указывает, как мы полагаем, на существенное влияние на динамические характеристики саморазогрева микролазера. Увеличение рабочей температуры лазера при больших токах особенно характерно для приборов малой площади, в частности вертикально-излучающих лазеров [13] и микродисков [14], так как тепловое сопротивление увеличивается при уменьшении размеров прибора. Вследствие роста температуры ток спонтанной рекомбинации I_{sp} продолжает расти за порогом лазерной генерации. Это в свою очередь может вызвать замедление роста частоты релаксационных колебаний, которая должна быть пропорциональна корню квадратному из тока стимулированной рекомбинации, т.е. $f_R \propto \sqrt{I - I_{sp}}$.

Также были выполнены измерения динамических характеристик микрокольцевого лазера при 28 и 13 °C. В последнем случае использовалось охлаждение с помощью элемента Пельтье. Мы уже отмечали, что частота отсечки не демонстрирует какой-либо регулярной зависимости от температуры. На рис. 4 обобщены температурные зависимости других параметров, влияющих на быстродействие. Пороговый ток заметно растет с температурой; зависимость может быть описана характеристической температурой 95 K. Эффективность модуляции при увеличении температуры с 13 до 55 °C снижается примерно в 1.5 раза, что, как мы полагаем, отражает уменьшение дифференциального усиления массива КТ при повышенных температурах. Уменьшение величины MCEF вследствие саморазогрева может быть еще одним фактором, влияющим на зависимость ширины полосы модуляции от тока. Значение K-фактора в пределах погрешности его определения остается неизменным при изменении температуры в исследованных пределах. В работе [15] отмечалось, что величина K-фактора КТ-лазера определяется суммой времени жизни фотонов в резонаторе и времени захвата носителей на состояние КТ, участвующее в генерации. Можно сделать вывод, что эти времена в исследованном температурном диапазоне практически не меняются.

Таким образом, исследовано быстродействие микрокольцевого лазера с квантовыми точками при температуре держателя 55 °C. Показано, что на предельное быстродействие значительное влияние оказывает саморазогрев микролазера, ведущий к замедлению роста как частоты релаксационных колебаний, так и полосы модуляции. В свою очередь влияние саморазогрева на быстродействие может быть объяснено ростом тока

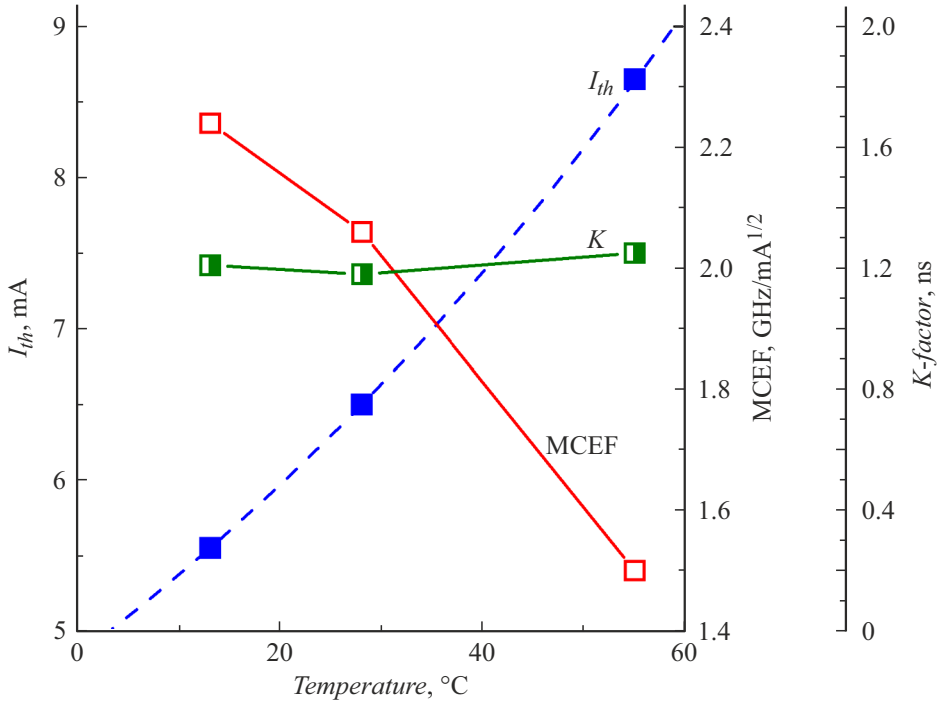


Рис. 4. Зависимость от температуры держателя порогового тока (I_{th}), коэффициента эффективности модуляции (MCEF) и *K*-фактора.

спонтанной рекомбинации и снижением дифференциального усиления активной области при повышении температуры.

Финансирование работы

Исследование выполнено в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ в 2025 г.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] Y. Wan, J. Norman, S. Liu, A. Liu, J.E. Bowers, IEEE Nanotechnol. Mag., **15** (2), 8 (2021). DOI: 10.1109/MNANO.2020.3048094
[2] V. Cao, J.-S. Park, M. Tang, T. Zhou, A. Seeds, S. Chen, H. Liu, Front. Phys., **10**, 839953 (2022). DOI: 10.3389/fphy.2022.839953
[3] Y. Wan, D. Jung, D. Inoue, J.C. Norman, C. Shang, A.C. Gossard, J.E. Bowers, in *2018 Progress in Electromagnetics Research Symp. (PIERS-Toyama)* (IEEE, 2018), p. 249. DOI: 10.23919/PIERS.2018.8598216
[4] F. Zubov, M. Maximov, N. Kryzhanovskaya, E. Moiseev, M. Muretova, A. Mozharov, N. Kaluzhnyy, S. Mintairov, M. Kulagina, N. Ledentsov, Jr., L. Chorchos, N. Ledentstsov, A. Zhukov, Opt. Lett., **44** (22), 5442 (2019). DOI: 10.1364/OL.44.005442
[5] C. Zhang, D. Liang, G. Kurczveil, A. Descos, R. Beausoleil, Optica, **6** (9), 1145 (2019). DOI: 10.1364/OPTICA.6.001145
[6] M.T. Todaro, A. Salhi, L. Fortunato, R. Cingolani, A. Passaseo, M.D. Vittorio, P.D. Casa, F. Ghiglieno, L. Bianco, IEEE Photon. Technol. Lett., **19** (4), 191 (2007). DOI: 10.1109/LPT.2006.890045
[7] E. Moiseev, N. Kryzhanovskaya, M. Maximov, F. Zubov, A. Nadtochiy, M. Kulagina, Yu. Zadiranov, N. Kalyuzhnyy, S. Mintairov, A. Zhukov, Opt. Lett., **43** (19), 4554 (2018). DOI: 10.1364/OL.43.004554
[8] M. Maximov, N. Gordeev, A. Payusov, Yu. Shernyakov, S. Mintairov, N. Kalyuzhnyy, M. Kulagina, A. Nadtochiy, V. Nevedomskiy, A. Zhukov, Laser Phys. Lett., **17** (9), 095801 (2020). DOI: 10.1088/1612-202X/aba0bf
[9] T.R. Chen, B. Zhao, L. Eng, Y.H. Zhuang, J. O'brien, A. Yariv, Electron. Lett., **29** (17), 1525 (1993). DOI: 10.1049/el:19931016
[10] P. Moser, J.A. Lott, G. Larisch, D. Bimberg, J. Lightwave Technol., **33** (4), 825 (2015). DOI: 10.1109/JLT.2014.2365237
[11] L.A. Coldren, S.W. Corzine, M.L. Mašanović, in *Diode lasers and photonic integrated circuits*, 2nd ed. (Wiley, Hoboken, N.J., 2012), p. 261.
[12] Z. Yao, C. Jiang, X. Wang, H. Chen, H. Wang, L. Qin, Z. Zhang, Nanomaterials, **12**, 1058 (2022). DOI: 10.3390/nano12071058
[13] P.P. Baveja, B. Kogel, P. Westbergh, J.S. Gustavsson, A. Haglund, D.N. Maywar, G.P. Agrawal, A. Larsson, Opt. Express, **19** (16), 15490 (2011). DOI: 10.1364/OE.19.015490
[14] A.E. Zhukov, N.V. Kryzhanovskaya, E.I. Moiseev, A.M. Nadtochiy, A.S. Dragunova, M.V. Maximov, F.I. Zubov, S.A. Kadinskaya, Yu. Berdnikov, M.M. Kulagina, S.A. Mintairov, N.A. Kalyuzhnyy, IEEE J. Quantum Electron., **56** (5), 2000908 (2020). DOI: 10.1109/JQE.2020.3009954
[15] M. Ishida, M. Sugawara, T. Yamamoto, N. Hatori, H. Ebe, Y. Nakata, Y. Arakawa, J. Appl. Phys., **101**, 013108 (2007). DOI: 10.1063/1.2407259