

07;08;09

## Влияние саморазогрева на модуляционные характеристики микродискового лазера

© А.Е. Жуков<sup>1</sup>, Э.И. Моисеев<sup>1,2</sup>, А.М. Надточий<sup>1,2</sup>, Н.В. Крыжановская<sup>1</sup>, М.М. Кулагина<sup>3</sup>, С.А. Минтаиров<sup>3</sup>, Н.А. Калюжный<sup>3</sup>, Ф.И. Зубов<sup>2</sup>, М.В. Максимов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет им. Ж.И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: zhukale@gmail.com

Поступило в Редакцию 2 марта 2020 г.

В окончательной редакции 2 марта 2020 г.

Принято к публикации 3 марта 2020 г.

Экспериментально исследовано быстродействие микродисковых лазеров с квантовыми точками, работающих при комнатной температуре без термостабилизации, а также выполнен расчет наибольшей полосы модуляции микродисков различного диаметра. Показано, что учет эффекта саморазогрева микролазера при больших токах смещения, проявляющегося в уменьшении предельного быстродействия и увеличении тока, при котором достигается максимальная полоса модуляции, позволяет хорошо описать экспериментальные данные. Наибольшее влияние саморазогрев оказывает на микролазеры малого диаметра (менее  $20 \mu\text{m}$ ).

**Ключевые слова:** высокочастотная модуляция, микролазер, полупроводниковый лазер, квантовые точки.

DOI: 10.21883/PJTF.2020.11.49488.18271

В последние годы значительное внимание уделяется микролазерам на основе микродисковых и микрокольцевых резонаторов с активной областью на основе квантовых точек, что обусловлено возможностью достижения малых размеров прибора (вплоть до  $1 \mu\text{m}$  при оптической накачке и менее  $10 \mu\text{m}$  при инжекционной накачке [1]) и низких пороговых токов ( $250 \text{ A/cm}^2$  при комнатной температуре [2]) в сочетании с простотой изготовления таких микролазеров. Для их создания нет необходимости применять распределенные брэгговские отражатели, токовые апертуры, многоэтапную литографию, а используемые эпитаксиальные гетероструктуры аналогичны применяемым при изготовлении полосковых лазеров. Одним из основных предполагаемых приложений микродисковых лазеров является оптическая передача данных на сверхкороткие расстояния, в предельном случае внутри оптоэлектронной интегральной схемы, в том числе на основе кремния. В связи с этим одной из наиболее важных приборных характеристик микродискового лазера является полоса модуляции  $f_{3 \text{ dB}}$ , определяемая как частота, при которой эффективность прямой модуляции падает относительно ее низкочастотного значения на 3 дБ.

Ограничение частоты модуляции может быть обусловлено множеством факторов [3], одним из которых является увеличение температуры прибора при протекании электрического тока большой плотности. Явление саморазогрева наиболее характерно для лазеров с малой площадью протекания тока и в связи с этим активно исследовалось применительно к поверхностно-излучающим лазерам с вертикальным резонатором [4,5]. В то же время влияние саморазогрева на высокочастотные характеристики микродисковых лазеров [6,7]

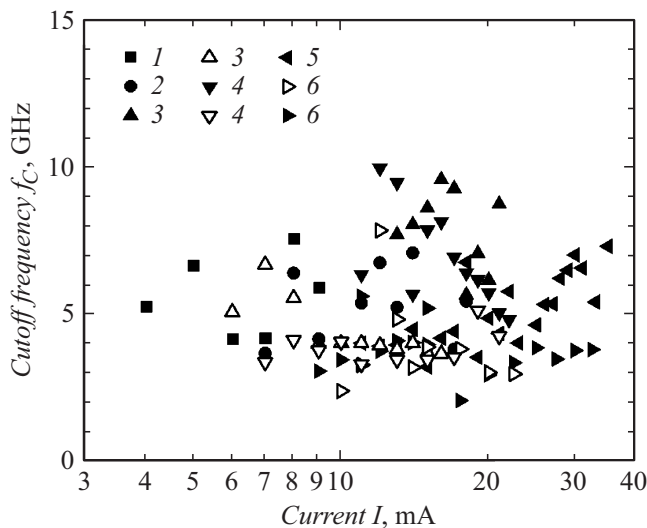
ранее, насколько нам известно, не изучалось. В настоящей работе с помощью сравнения экспериментальных данных и результатов численного моделирования исследуется относительный вклад саморазогрева в ограничение предельной частоты модуляции инжекционных микродисковых лазеров с квантовыми точками, работающих при комнатной температуре без принудительного охлаждения.

Приведенные в настоящей работе экспериментальные значения полосы модуляции  $f_{3 \text{ dB}}$  определялись на основе малосигнальной амплитудно-частотной характеристики  $A(f)$ , измеряемой в диапазоне 0.1–20 GHz при различных токах смещения. Мы анализируем результаты, полученные при исследовании микролазеров с квантовыми точками (In,Ga)As высокой плотности [8]. Микролазеры формировались при глубоком травлении эпитаксиальной гетероструктуры с последующим изготовлением электрических контактов к подложке и верху цилиндрической мезы. Такие микролазеры продемонстрировали на данный момент наибольшие значения полосы модуляции более 6 GHz [9], что позволило реализовать с их помощью оптическую передачу данных со скоростью 10 Gb/s [10].

Использованные в расчетах параметры микролазеров приведены в таблице. Пороговый ток исследуемых микродисковых лазеров характеризуется двухкомпонентной зависимостью от диаметра микролазера: слабое, пропорциональное площади прибора, может быть сопоставлено с рекомбинацией в объеме активной области, а слабое, пропорциональное периметру, — с поверхностной рекомбинацией на боковых стенках.

Параметры микродисковых лазеров, использованные при расчетах

Параметр	Значение	Лит. ссылка
Диаметр микродиска $d$	10–30 $\mu\text{m}$	
Напряжение открывания диода $U_0$	1.446 V	[9]
Удельное электрическое сопротивление $\rho_S$	$1 \cdot 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$	[11]
Удельное тепловое сопротивление $\rho_T$	$2.8 \cdot 10^{-3} \text{cm}^2 \cdot \text{K/W}$	[12]
Удельный пороговый ток:		
компонента рекомбинации в объеме $J_2$	630 A/cm <sup>2</sup>	
компонента поверхностной рекомбинации $J_1$	0.75 A/cm	[9]
Характеристическая температура $T_0$	90 K	[12]
$K$ -фактор	0.8 ns	[13]
Смещение коэффициента затухания релаксационных колебаний $\gamma_0$	$1.2 \text{ ns} + 40 \text{ GHz} \cdot \mu\text{m}/d$	[13]
Коэффициент эффективности модуляции MCEF	$40 (\text{GHz}/\text{mA}^{0.5}) \cdot \mu\text{m}/d$	[9]
Паразитная частота отсечки $f_c$	5 GHz	Наст. раб.
Коэффициент нелинейного насыщения усиления $\varepsilon_P$	$< 0.1 \text{ mW}^{-1}$	[14]



**Рис. 1.** Значения паразитной частоты отсечки, экспериментально определенные для микродисковых лазеров разного диаметра при различном токе смещения. Диаметр микродиска,  $\mu\text{m}$ : 1 — 10, 2 — 14, 3 — 19, 4 — 23, 5 — 27, 6 — 31.

$K$ -фактор не демонстрирует регулярной зависимости от диаметра микролазера, что согласуется с предсказаниями теории [15], согласно которым зависящие от диаметра радиационные потери, обусловленные кривизной резонатора, становятся заметными, лишь когда его размер сопоставим с длиной волны излучения. Коэффициент нелинейного насыщения усиления пренебрежимо мал, что обусловлено низкой оптической мощностью микродисковых лазеров.

Паразитная частота отсечки  $f_c$ , связанная с емкостными и/или индукционными элементами СВЧ-схемы, а также с конечными временами транспорта и захвата носителей в активную область лазера, была определена подгонкой экспериментальной модуляционной характеристики  $A(f)$  с помощью выражения, которое было

получено из анализа скоростных уравнений лазера [16]:

$$A(f) = \frac{f_R^4}{(f_R^2 - f^2)^2 + f^2 \left(\frac{\gamma}{2\pi}\right)^2} \frac{1}{1 + \frac{f^2}{f_c^2}}, \quad (1)$$

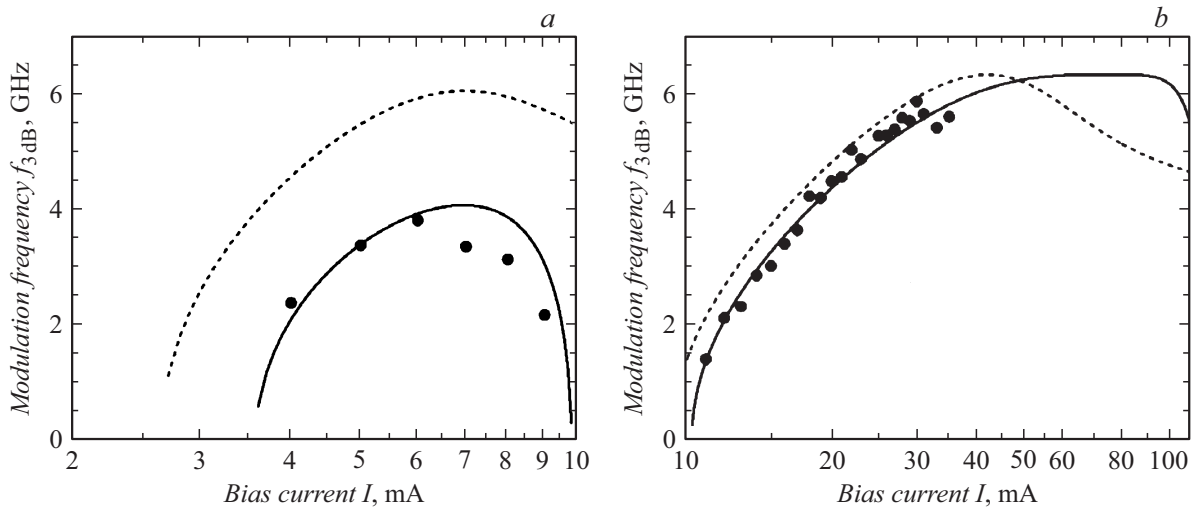
где  $f_R$  — частота релаксационных колебаний,  $\gamma$  — коэффициент затухания релаксационных колебаний. Рис. 1 обобщает значения  $f_c$  в зависимости от тока смещения  $I$  для микролазеров различного диаметра. Как видно,  $f_c$  не демонстрирует какой-либо закономерной зависимости от тока и/или диаметра. Среднее значение, использованное при расчетах в настоящей работе, составляет  $5 \pm 2 \text{ GHz}$ .

Ширина полосы модуляции микролазера при некотором токе смещения определялась решением уравнения  $A(f_{3\text{dB}}) = 1/2$ . При этом для нахождения зависящих от тока значений частоты релаксационных колебаний и коэффициента затухания мы использовали известные выражения [17]:

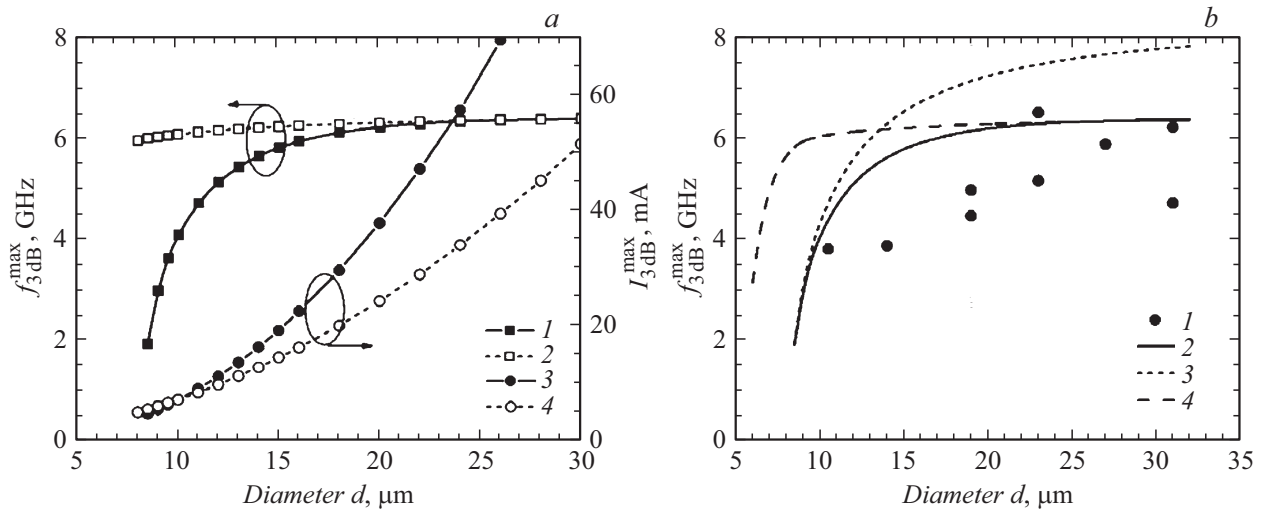
$$f_R = D\sqrt{I - I_{th}}, \quad \gamma = Kf_R^2 + \gamma_0,$$

где так называемый  $D$ -фактор связан в области малых токов смещения с эффективностью модуляции соотношением  $\text{MCEF} = \sqrt{1 + \sqrt{2}D}$ ,  $I_{th}$  — пороговый ток микролазера.

Чтобы учесть явление саморазогрева, мы полагали, что  $I_{th} = I_0 \exp(\Delta T/T_0)$ ,  $\Delta T = R_T U I$ , где  $I_0$  — зависящий от диаметра микролазера пороговый ток в отсутствие саморазогрева (при фиксированной температуре  $T_{ref} = 293 \text{ K}$ ),  $\Delta T$  — дополнительное увеличение температуры вследствие выделения джоулева тепла  $U I$ ,  $R_T$  — тепловое сопротивление,  $U = U_0 + I R_S$  — падение напряжения на лазерном диоде,  $R_S$  — последовательное электрическое сопротивление. Поскольку  $D$ -фактор пропорционален корню квадратному от дифференциального усиления активной области [17], чтобы учесть снижение дифференциального усиления с ростом температуры, мы полагали  $\text{MCEF} \propto \sqrt{T_{ref}/(T_{ref} + \Delta T)}$ . Увеличение



**Рис. 2.** Зависимость предельной частоты модуляции по уровню  $-3$  dB от тока смещения для микродисковых лазеров диаметром 10 (a) и 27  $\mu\text{m}$  (b). Символы — эксперимент, пунктирная линия — расчет без учета саморазогрева, сплошная линия — расчет с учетом саморазогрева.



**Рис. 3.** Зависимости от диаметра микродиска: a — максимальной достижимой частоты модуляции (1, 2) и соответствующего ей тока смещения (3, 4), рассчитанные с учетом (1, 3) и без учета (2, 4) саморазогрева; b — максимальной достижимой частоты модуляции (1 — эксперимент, 2 — расчет с учетом саморазогрева, 3 и 4 — расчет в предположении в 2 раза большей паразитной частоты отсечки или в 2 раза меньшего теплового сопротивления соответственно).

температуры активной области при больших токах смещения и вызванный этим быстрый рост порогового тока ведут к уменьшению величины  $I - I_{th}$ , что может привести к дополнительному (вызванному саморазогревом) снижению эффективности модуляции.

На рис. 2 показаны экспериментальные значения полосы модуляции  $f_{3dB}$  в зависимости от тока смещения  $I$  для двух микродисковых лазеров относительно малого и относительно большого размера (диаметр  $d = 10$  и 27  $\mu\text{m}$  соответственно). После начального участка возрастания  $f_{3dB}$  наблюдается насыщение (для микродиска большого диаметра) и последующий спад (для микродиска меньшего диаметра) предельной частоты модуляции с ростом тока. На рис. 2 приведено также

сравнение экспериментальных данных с результатами моделирования, выполненного с учетом и без учета влияния саморазогрева. Как видно, учет саморазогрева позволяет достичь (без использования каких-либо дополнительных подгоночных параметров) хорошего согласия между экспериментом и расчетом для микродисков как большого, так и малого размера. Наиболее существенным учет перегрева оказывается для микролазеров малого диаметра, для которых расчет, выполненный без учета влияния саморазогрева, существенно (примерно на 2 GHz) завышает значение  $f_{3dB}$ . Для микродиска большого размера это различие не превышает 0.5 GHz.

Для микролазера некоторого диаметра существует наибольшее значение полосы модуляции  $f_{3dB}^{max}$ , которое

достигается при некотором оптимальном токе смещения  $I_{3\text{dB}}^{\text{max}}$ . В том случае, если влияние паразитной отсечки и саморазогрева пренебрежимо мало, лазер достигает наибольшего быстродействия при переходе из режима слабого демпфирования в режим сильного демпфирования релаксационных колебаний. При этом  $f_{3\text{dB}}^{\text{max}} \approx 2\sqrt{2}\pi/K$ , что для рассматриваемых микролазеров соответствует частоте свыше 10 GHz. Экспериментальные и расчетные значения полосы модуляции оказываются заметно ниже. Следует отметить, что расчет зависимости полосы модуляции от тока с учетом саморазогрева для большого микродиска предсказывает наличие плоского максимума, так что  $f_{3\text{dB}}$  перестает меняться в широком диапазоне токов смещения (в рассмотренном примере от 40 до 100 mA). При этом ток  $I_{3\text{dB}}^{\text{max}}$  заметно сдвинут в область больших значений по сравнению с положением максимума зависимости без учета перегрева.

Рис. 3, а обобщает расчетные значения  $f_{3\text{dB}}^{\text{max}}$  и  $I_{3\text{dB}}^{\text{max}}$  для микролазеров различного диаметра. Если саморазогрев микролазера не принимается во внимание,  $f_{3\text{dB}}^{\text{max}}$  практически не зависит от размеров прибора, оставаясь на уровне 6–6.5 GHz. Такое поведение связано с тем, что внутренние параметры ( $K$ -фактор и паразитная частота отсечки), в основном определяющие быстродействие в отсутствие саморазогрева, не зависят от диаметра. Саморазогрев практически не сказывается на предельном быстродействии больших микродисков, однако ведет к быстрому снижению  $f_{3\text{dB}}^{\text{max}}$  при уменьшении диаметра менее 20  $\mu\text{m}$ .

На рис. 3, б символами  $I$  представлены наибольшие измеренные значения полосы модуляции. Они, как и ожидалось, покрывают область значений, лежащую несколько ниже  $f_{3\text{dB}}^{\text{max}}$ , вычисленной с учетом саморазогрева (сплошная линия 2). В эксперименте также наблюдается заметное уменьшение быстродействия при снижении размеров микродиска. На рисунке приведены также результаты расчетов для двух гипотетических случаев: увеличение паразитной частоты отсечки в 2 раза (пунктирная линия 3) либо двукратное уменьшение теплового сопротивления (штриховая линия 4) по сравнению со значениями соответствующих параметров, приведенными в таблице. Как видно, рост  $f_C$  оказывает некоторое влияние на быстродействие больших ( $d > 15 \mu\text{m}$ ) микродисков, однако практически не влияет на полосу модуляции микролазеров малого диаметра. В противоположность этому улучшение теплового сопротивления ведет к тому, что предельные значения полосы модуляции в микродисках малого диаметра заметно возрастают и оказываются сопоставимыми с  $f_{3\text{dB}}^{\text{max}}$ , а резкий спад  $f_{3\text{dB}}^{\text{max}}$  наблюдается только для лазеров, диаметр которых меньше  $\sim 7 \mu\text{m}$ .

Таким образом, предельное быстродействие микродисковых лазеров относительно малого размера определяется в основном явлениями, вызванными перегревом активной области, тогда как для микродисков большего размера максимальная полоса модуляции ограничивается демпфированием релаксационных колебаний и паразитной частотой отсечки. Граница, разделяющая две

различные модели поведения при реализованных на практике значениях внутренних параметров микролазеров, соответствует диаметру около 20  $\mu\text{m}$ . Выше этого размера микродиска предельная частота модуляции практически не зависит от диаметра микродиска, а ниже заметно уменьшается.

## Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (соглашение 19-72-30010). Оптические исследования осуществлены в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ в 2020 году.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] Mao M.-H., Chien H.-C., Hong J.-Z., Cheng C.-Y. // Opt. Express. 2011. V. 19. N 15. P. 14145–14151.
- [2] 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. // Semiconductors. 2019. V. 53. N 14. P. 1888–1890.
- [3] Vertical-cavity surface-emitting laser devices / Eds H. Li, K. Iga. Heidelberg: Springer-Verlag, 2003. 386 p.
- [4] Al-Omari A.N., Lear K.L. // IEEE Photon. Technol. Lett. 2005. V. 17. N 9. P. 1767–1769.
- [5] Baveja P.P., Kogel B., Westbergh P., Gustavsson J.S., Haglund A., Maywar D.N., Agrawal G.P., Larsson A. // Opt. Express. 2011. V. 19. N 16. P. 15490–15505.
- [6] Lv X.M., Huang Y.Z., Zou L.X., Long H., Du Y. // Laser Photon. Rev. 2013. V. 7. N 5. P. 818–829.
- [7] Wan Y., Inoue D., Jung D., Norman J.C., Shang C., Gossard A.C., Bowers J.E. // Photon. Res. 2018. V. 6. N 8. P. 776–781.
- [8] Mintairov S.A., Kalyuzhnyy N.A., Lantratov V.M., Maximov M.V., Nadtochiy A.M., Rouvimov S., Zhukov A.E. // Nanotechnology. 2015. V. 26. N 38. P. 385202.
- [9] Kryzhanovskaya N.V., Moiseev E.I., Zubov F.I., Mozharov A.M., Maximov M.V., Kalyuzhnyy N.A., Mintairov S.A., Guseva Yu.A., Kulagina M.M., Blokhin S.A., Berdnikov Yu., Zhukov A.E. // J. Appl. Phys. 2019. V. 126. N 6. P. 063107.
- [10] Zubov F., Maximov M., Kryzhanovskaya N., Moiseev E., Muretova M., Mozharov A., Kaluzhnyy N., Mintairov S., Kulagina M., Ledentsov N., Jr., Chorchos L., Ledentstov N., Zhukov A. // Opt. Lett. 2019. V. 44. N 22. P. 5442–5445.
- [11] Жуков Ф.И., Моисеев Э.И., Корнышов Г.О., Крыжановская Н.В., Шерняков Ю.М., Паюсов А.С., Кулагина М.М., Калужный Н.А., Минтаиров С.А., Максимов М.В., Жуков А.Е. // Письма в ЖТФ. 2019. Т. 45. В. 19. С. 37–39.
- [12] Moiseev E., Kryzhanovskaya N., Maximov M., Zubov F., Nadtochiy A., Kulagina M., Zadiranov Yu., Kalyuzhnyy N., Mintairov S., Zhukov A. // Opt. Lett. 2018. V. 43. N 19. P. 4554–4557.

- [13] Жуков А.Е., Моисеев Э.И., Крыжановская Н.В., Блохин С.А., Кулагина М.М., Гусева Ю.А., Минтаиров С.А., Калюжный Н.А., Можаров А.М., Зубов Ф.И., Максимов М.В. // ФТП. 2019. Т. 53. В. 8. С. 1122–1127.
- [14] Kryzhanovskaya N.V., Moiseev E.I., Zubov F.I., Mozharov A.M., Maximov M.V., Kalyuzhnyy N.A., Mintairov S.A., Kulagina M.M., Blokhin S.A., Kudryavtsev K.E., Yablonskiy A.N., Morozov S.V., Berdnikov Yu., Rouvimov S., Zhukov A.E. // *Photon. Res.* 2019. V. 7. N 6. P. 664–668.
- [15] Slusher R.E., Levi A.F.J., Mohideen U., McCall S.L., Pearton S.J., Logan R.A. // *Appl. Phys. Lett.* 1993. V. 63. N 10. P. 1310–1313.
- [16] Coldren L.A., Corzine S.W., Mašanović M.L. Diode lasers and photonic integrated circuits. 2nd ed. Hoboken, N.J.: John Wiley & Sons, 2012. 709 p.
- [17] Semiconductor lasers I. Fundamentals / Ed. E. Kapon. San Diego: Academic Press, 1999. 453 p.