

Лазерная генерация в микродисках сверхмалого диаметра

© А.Е. Жуков^{*+†¶}, Н.В. Крыжановская^{+•}, М.В. Максимов^{•*}, А.А. Липовский^{*•}, А.В. Савельев^{*+•},
А.А. Богданов^{*•}, И.И. Шостак^{*}, Э.И. Моисеев^{*}, Д.В. Карпов^{*■}, J. Laukkanen[■], J. Tommila[♦]

^{*} Санкт-Петербургский Академический университет — научно-образовательный центр нанотехнологий Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

⁺ Санкт-Петербургский научный центр Российской академии наук, 199034 Санкт-Петербург, Россия

[•] Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 195251 Санкт-Петербург, Россия

[†] Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

[■] Institute of Photonics, University of Eastern Finland, 80130 Joensuu, Finland

[♦] Optoelectronics Research Centre, Tampere University of Technology, 33101 Tampere, Finland

(Получена 5 июня 2014 г. Принята к печати 16 июня 2014 г.)

Проведены расчеты и представлены экспериментальные результаты, демонстрирующие возможность достижения лазерной генерации при комнатной температуре на основном оптическом переходе квантовых точек InAs/InGaAs/GaAs в оптических микрорезонаторах, имеющих рекордно малый диаметр 1.5 мкм. В резонаторах размером 1 мкм генерация возникает на длине волны одной из мод шепчущей галереи в пределах полосы первого возбужденного перехода.

1. Введение

В последнее время активно исследуются микролазеры, имеющие резонатор в форме микрокольца (МКР) или микродиска (МДР) [1,2]. В них в отличие от вертикально излучающих лазеров наивысшей добротностью обладают моды шепчущей галереи (МШГ), распространяющиеся по окружности резонатора. Благодаря тому, что отражение волны от боковой поверхности структуры происходит под скользким углом, в резонаторах с МШГ возможно достижение низкопороговой генерации при размерах, гораздо меньших по сравнению с типичными для лазерных резонаторов Фабри-Перо. Кроме того, малые размеры МШГ-резонатора, обеспечивая большое расстояние между соседними резонансными длинами волн, способствуют достижению одночастотной генерации. Все это в сочетании с выводом излучения в плоскости структуры делает МКР и МДР привлекательными кандидатами для использования в будущих системах оптической связи на плате.

Особенно перспективным представляется использование в качестве активной области массивов самоорганизующихся квантовых точек (КТ) [3]. Благодаря глубокой локализации носителей заряда в структурах с КТ латеральный транспорт носителей затруднен и как результат влияние безызлучательной рекомбинации на боковых стенках микрорезонатора подавлено. В последние годы в МКР и МДР на основе КТ спектрального диапазона около 1.3 мкм продемонстрирована возможность лазерной генерации в структурах, перенесенных на поверхность кремния [4], лазерная генерация вплоть до 107°C [5], а

также достижение генерации при комнатной температуре вплоть до диаметра 2.7 мкм [6].

Следует отметить, что наибольший интерес представляют микролазеры возможно меньшего размера, поскольку спектральное расстояние между соседними модами растет с уменьшением диаметра, способствуя достижению одночастотной генерации. В то же время потери, связанные с изгибом волновода (кривизной его боковой поверхности), экспоненциально растут при уменьшении радиуса микродискового/микрокольцевого резонатора [7] и оказываются доминирующими в микрорезонаторах малых размеров. Например, выполненные в работе [8] расчеты добротности кольцевого резонатора на основе кремния на изоляторе дают для длины волны вблизи 1.5 мкм значения потерь около 4 см^{-1} для радиуса 1.5 мкм, тогда как при уменьшении радиуса до 1 мкм потери возрастают до 100 см^{-1} . Поскольку оптическое усиление, которое может быть достигнуто на основном оптическом переходе квантовых точек, ограничено (так называемое „насыщенное усиление“), должен существовать минимальный размер резонатора, до которого может быть реализована лазерная генерация в микролазере с квантовыми точками.

В настоящей работе нами исследованы микрорезонаторы с КТ предельно малого диаметра (до 1 мкм). Показано, что вплоть до внешнего диаметра микрорезонатора 1.5 мкм генерация происходит на длине волны МШГ, попадающей в полосу основного оптического перехода КТ InAs/InGaAs/GaAs. Насколько нам известно, это является наименьшим сообщенным к настоящему времени размером МШГ-резонатора с квантовыми точками, в котором лазерная генерация достигнута при комнатной

¶ E-mail: zhukale@gmail.com

температуре. В резонаторах размером 1 мкм генерация возникает на длине волны одной из мод шепчущей галереи в пределах полосы первого возбужденного перехода. Экспериментальные результаты находятся в согласии с результатами расчетов оптических потерь, возникающих вследствие изгиба волновода, и их соотношения с насыщенным усилением основного перехода квантовых точек.

2. Эксперимент

Эпитаксиальный синтез методом молекулярно-пучковой эпитаксии был осуществлен в установке Riber 49 на полуизолирующей подложке GaAs(100). Пять рядов КТ InAs/InGaAs были помещены в середину волноводного слоя толщиной 0.2 мкм, ограниченного со стороны подложки слоем $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ толщиной 400 нм. Максимум излучения основного перехода (GS) КТ находился при комнатной температуре на длине волны около 1.28 мкм, первого возбужденного перехода (ES) — 1.2 мкм.

МДР и МКР были сформированы с использованием SiO_2 -маски, сформированной с помощью атомно-слоевого осаждения, нанесения негативного резиста, последующей электронно-лучевой литографии и реактивного ионного травления. Высота сформированных полупроводниковых микрорезонаторов составила около 0.5 мкм, внешний диаметр D варьировался от 1 до 5 мкм, внутренний диаметр d от 0 (МДР) до приблизительно $0.85D$, так что минимальная ширина волновода $(D - d)/2$ составила 0.3 мкм (рис. 1). Буферный слой $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ не подвергался преднамеренному окислению.

Оптические исследования проводились при накачке YAG:Nd-лазером, работающим в непрерывном режиме на длине волны 532 нм. Мощность накачки, падающая

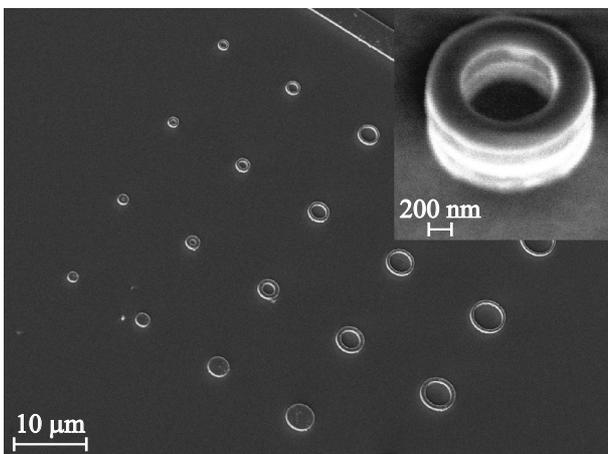


Рис. 1. Полученная с помощью растрового электронного микроскопа фотография массива микрорезонаторов различного размера. На вставке — изображение МКР, имеющего $D = 1.5$ мкм, $d = 0.9$ мкм.

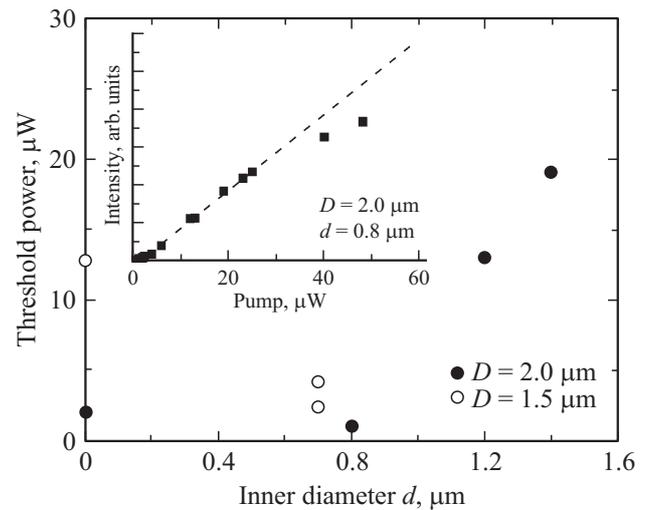


Рис. 2. Пороговая мощность для микрорезонаторов различных размеров. На вставке — зависимость интенсивности доминантного пика от мощности возбуждения для МКР, имеющего $D = 2$ мкм, $d = 0.8$ мкм.

на поверхность образца, варьировалась от 0.1 мкВт до единиц мВт. Лазерный луч фокусировался в пятно диаметром около 3 мкм с помощью объектива Olympus LMPlan IR 100 NA 0.8. Этот же объектив использовался для сбора сигнала. Детектирование проводилось с помощью монохроматора FHR 1000 и многоканального охлаждаемого InGaAs-фотодетектора Horiba Symphony (разрешение 0.05 нм).

3. Спектральные и пороговые характеристики

В спектрах излучения микрорезонаторов наблюдается серия узких одиночных пиков или дублетов, обусловленных МШГ различных порядков. Число возбуждаемых мод уменьшается при уменьшении внешнего диаметра микрорезонатора и росте его внутреннего диаметра. При увеличении мощности накачки интенсивность доминирующей линии (дублета) демонстрирует характерное пороговое поведение, свидетельствующее о переходе в режим лазерной генерации (см. вставку на рис. 2). Измеренная полуширина линий излучения при этом может составлять 0.05–0.07 нм, будучи ограниченной спектральным разрешением оптической системы. При дальнейшем увеличении накачки зависимость интенсивности линии излучения от мощности возбуждения насыщается, а линии уширяются, как правило, до 0.2–0.3 нм.

Пороговая мощность лазерной генерации для микрорезонаторов с внешним диаметром 1.5–2 мкм и различными значениями внутреннего диаметра приведена на рис. 2. Как видно, пороговая мощность лазерной генерации составляет от единиц до десятков микроватт. При этом с ростом внутреннего диаметра порог генерации сперва уменьшается, а затем начинает возрастать.

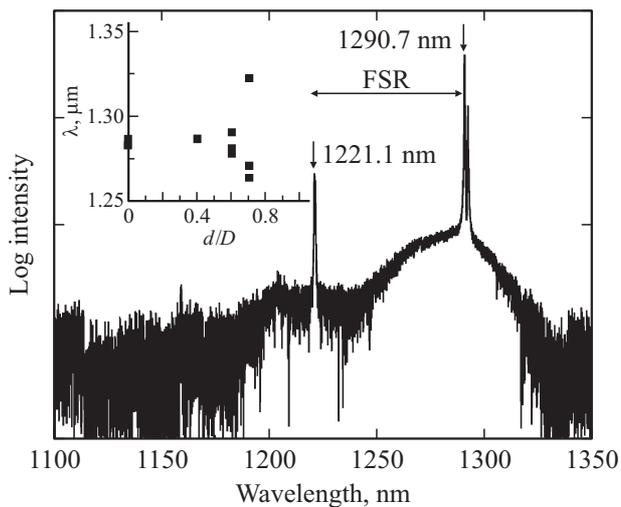


Рис. 3. Спектр лазерной генерации для МКР, имеющего $D = 2 \mu\text{м}$, $d = 1.2 \mu\text{м}$. На вставке — положение доминантной линии в микрорезонаторах с внешним диаметром $D = 2 \mu\text{м}$ при различном значении d .

тать. Аналогичное поведение наблюдалось раньше и в микролазерах, имеющих внешний диаметр 6–7 мкм [5]. Наименьшее значение пороговой мощности 1 мкВт было достигнуто в случае $D/d = 2/0.8 \mu\text{м}$. Если учесть частичное отражение света от поверхности образца, а также геометрический фактор, связанный с разницей площадей микрорезонатора и возбуждающего лазерного луча, можно оценить эффективное значение порога генерации равным 0.26 мкВт.

На рис. 3 приведен пример спектра лазерной генерации, записанный от микрорезонатора с внешним и внутренним диаметрами 2 и 1.2 мкм соответственно. Доминирующая линия излучения имеет длину волны 1290.7 нм, ее спектральное положение попадает в полосу основного перехода КТ. Более коротковолновая линия излучения (1221.1 нм) соответствует МШГ, отличающейся значением азимутального индекса m на 1. Таким образом, свободный спектральный диапазон FSR составил 69.6 нм, что позволяет оценить эффективный групповой индекс N_{eff} равным 3.61 с использованием известного выражения:

$$FSR \approx \frac{\lambda^2}{\pi D N_{\text{eff}}}. \quad (1)$$

Следует отметить, что показатель преломления GaAs на длине волны 1.31 мкм составляет около 3.4–3.5 [9,10]. Более высокое значение группового индекса обусловлено зависимостью показателя преломления слоев, образующих структуру микрорезонатора, от длины волны. К примеру, в изготовленном из кремния МКР диаметром 3 мкм эффективный групповой индекс был определен [4,2] [8], при том, что показатель преломления кремния вблизи 1.55 мкм составляет 3.48 [9].

На рис. 4 приведена зависимость эффективного группового индекса от внешнего диаметра микрорезонато-

ра. Каждая точка, соответствующая некоторому значению D , представляет собой среднее значение N_{eff} , оцененное для всей совокупности таких микрорезонаторов, в том числе и отличающихся внутренним диаметром d . Как видно, в пределах погрешности, которую мы оцениваем не превышающей ± 0.15 , групповой индекс не зависит от размеров резонатора, в том числе и в наименьших исследованных микрорезонаторах, имеющих диаметр 1 мкм. Его среднее значение определено равным 3.7, что является оценкой сверху для n_{eff} — эффективного показателя преломления слоистой структуры резонатора.

Нами не было обнаружено какой-либо закономерности в поведении спектрального положения доминантной линии излучения при изменении внутреннего диаметра микрорезонатора d , при условии, что внешний диаметр D фиксирован (см. вставку на рис. 3). В некоторых случаях разброс положения линии составил несколько десятков нм. Так, например, для МКР/МДР с внешним диаметром 2 мкм линия генерации в различных образцах имела длину волны от 1264 до 1322 нм. Однако во всех микрорезонаторах, внешний диаметр которых D был больше либо равен 1.5 мкм, линия генерации находилась в пределах полосы основного перехода квантовых точек. В то же время в наименьшем из исследованных микрорезонаторов ($D = 1 \mu\text{м}$) лазерная генерация возникла на длине волны 1177 нм, что попадает в полосу первого возбужденного оптического перехода КТ.

Зависимость среднего значения длины волны генерации от внешнего диаметра, представленная на рис. 4, позволяет проследить тенденцию к переходу от генерации на основном переходе к генерации на возбужденном переходе квантовых точек. Такое поведение аналогично перескоку длины волны, который имеет место в лазерах

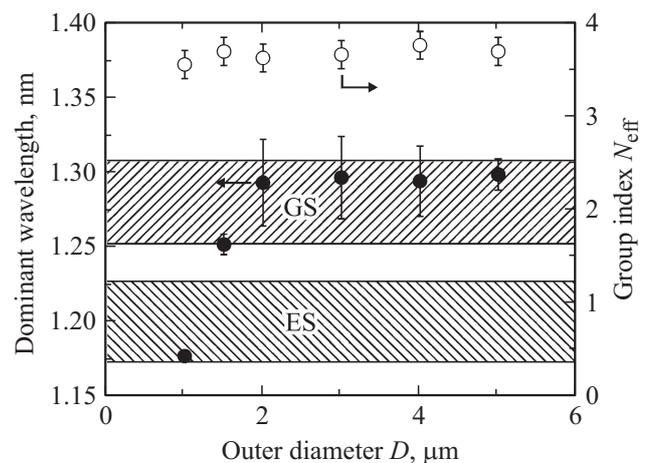


Рис. 4. Эффективный групповой индекс (белые символы) и длина волны доминантной моды (черные символы) в зависимости от внешнего диаметра микрорезонатора. Штриховая линия — среднее значение N_{eff} ; заштрихованные области отвечают спектральной полосе основного (GS) или первого возбужденного (ES) переходов КТ.

полосковой конструкции при уменьшении длины их резонатора.

4. Излучательные потери

Внутренняя (или излучательная) добротность, т.е. добротность, ограниченная исключительно оптическими потерями вследствие утекания моды из искривленного волновода, может быть оценена для мод шепчущей галереи с помощью выражения [11]

$$Q \approx be^{2mJ}, \quad (2)$$

где $J = \text{arth}(s) - s$, $s = \sqrt{1 - 1/n_{\text{eff}}^2}$, $b \approx 1/7$, m — азимутальный порядок МШГ, который в первом приближении может быть найден из условия обращения поля в нуль на границе резонатора радиуса R :

$$(2\pi n_{\text{eff}}/\lambda)R = T_{mq}. \quad (3)$$

Здесь T_{mq} обозначает q -й по счету корень функции Бесселя m -го порядка (для МШГ первого радиального порядка, $q = 1$), λ — резонансная длина волны, которую для доминирующей моды можно полагать близкой к длине волны λ_0 оптического перехода активной области.

При больших m и не слишком больших q корни функции Бесселя приближенно равны m , так что азимутальный порядок моды m оказывается прямо пропорционален радиусу резонатора, а внутренняя добротность соответственно оказывается экспоненциально возрастающей с ростом R .

В [12] приведено несколько иное выражение для оценки величины излучательной добротности диэлектрического цилиндра, которое с использованием выше введенных обозначений запишется в виде

$$Q \approx Be^{mJ}, \quad (4)$$

где $B = (1/2)Pn_{\text{eff}}^2sm$, $P = 1$ или $1/n^2$ для мод ТЕ- и ТМ-типа соответственно. Как видно, отличие выражения (4) от (2) заключается в ином предэкспоненциальном множителе, а также в отсутствии коэффициента 2 в показателе экспоненты.

На рис. 5 приведена зависимость потерь, возникающих вследствие искривления волновода, от его радиуса, вычисленная с использованием (2) и (4). Мы воспользовались известным соотношением между оптическими потерями α в резонаторе и добротностью $Q = 2\pi n_{\text{eff}}/(\lambda Q)$. Ступенчатый характер зависимостей обусловлен дискретным характером изменения порядка моды m .

На рис. 5 также приведена оценка насыщенного усиления G_{sat} на основном оптическом переходе квантовых точек, использованных в качестве активной области исследуемых в настоящей работе микрорезонаторов. Оценка основывается на обобщении экспериментальных значений G_{sat} , полученных в торцевых лазерах на основе многослойных массивов квантовых точек спектрального

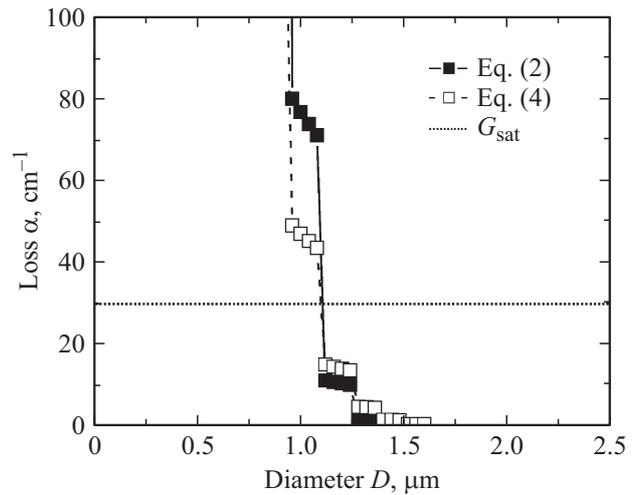


Рис. 5. Зависимость излучательных потерь в микродисковом резонаторе от его диаметра (расчет для $n_{\text{eff}} = 3.5$, $\lambda_0 = 1.3$ мкм с помощью (2) — белые символы, (4) — черные символы); пунктирная линия — насыщенное усиление на основном переходе КТ.

диапазона 1.3 мкм [13] с учетом влияния числа рядов КТ и геометрии вертикального волновода на фактор оптического ограничения. Как видно, даже без учета других видов потерь, помимо возникающих вследствие утекания моды из изогнутого волновода, достижимое на основном переходе КТ оптическое усиление окажется недостаточным для преодоления потерь в микродисках диаметром около 1.1 мкм и меньше. Соответственно переход в режим лазерной генерации мод шепчущей галереи на основном переходе квантовых точек окажется невозможным в резонаторах столь малого размера.

К представленным на рис. 5 значениям следует относиться с известной осторожностью в связи с приближенным характером выражений, лежащих в основе расчетов излучательных потерь, а также неопределенностью относительно величины n_{eff} и вкладов других типов оптических потерь. Тем не менее оценка предельного размера микрорезонатора достаточно хорошо описывает реальную ситуацию, что обусловлено чрезвычайно резким возрастанием излучательных потерь при уменьшении размеров. Расчеты, приведенные на рис. 5, также превосходно согласуются с экспериментально наблюдаемым отсутствием генерации на основном оптическом переходе в микрорезонаторах, диаметр которых меньше 1.5 мкм (рис. 4).

5. Заключение

Таким образом, продемонстрировано, что в микрорезонаторах на основе КТ InAs/InGaAs/GaAs спектрального диапазона около 1.3 мкм возможно реализовать лазерную генерацию при комнатной температуре на основном переходе КТ даже в резонаторах столь малого размера,

как 1.5 мкм. При этом порог лазерной генерации остается в мВт-диапазоне. Расчет уровня излучательных потерь в зависимости от размеров резонатора также предсказывает, что при D около 1.1 мкм оптическое усиление на основном переходе не сможет превысить потери. Также нами определено значение эффективного группового индекса, которое оказалось равным 3.7 вне зависимости от размеров резонатора микрорезонатора вплоть до 1 мкм.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ и Академии Финляндии (проект 267270). Э.И.М. благодарит программу „УМНИК“ и грант Комитета по науке и высшей школе Санкт-Петербурга.

Список литературы

- [1] S.L. McCall, A.F.J. Levi, R.E. Slusher, S.J. Pearton, R.A. Logan. *Appl. Phys. Lett.*, **60**, 289 (1992).
- [2] M. Munsch, J. Claudon, N.S. Malik, K. Gilbert, P. Grosse, J.-M. Gerard, F. Albert, F. Langer, T. Schlereth, M.M. Pieczarka, S. Hofling, M. Kamp, A. Forchel, S. Reitzenstein. *Appl. Phys. Lett.*, **100**, 031 111 (2012).
- [3] Н.В. Крыжановская, М.В. Максимов, А.Е. Жуков. *Квант. электрон.*, **44** (3), 189 (2014).
- [4] А.М. Надточий, Н.В. Крыжановская, М.В. Максимов, А.Е. Жуков, Э.И. Моисеев, М.М. Кулагина, К.А. Ваданова, Ю.М. Задиранов, И.С. Мухин, Е.М. Аракчеева, D. Livshits, А.А. Липовский. *ПЖТФ*, **23** (18), 70 (2013).
- [5] А.Е. Zhukov, N.V. Kryzhanovskaya, A.V. Savelyev, A.M. Nadtochiy, E.M. Arakcheeva, F.I. Zubov, V.V. Korenev, M.V. Maximov, Yu.M. Shernyakov, M.M. Kulagina, I.A. Slovinskiy, D.A. Livshits, A. Kapsalis, Ch. Mesaritakis, D. Syvridis, A. Mintairov. *Proc. SPIE*, **8552**, 855 202 (2012).
- [6] Н.В. Крыжановская, А.Е. Жуков, А.М. Надточий, М.В. Максимов, Э.И. Моисеев, М.М. Кулагина, А.В. Савельев, Е.М. Аракчеева, А.А. Липовский, Ф.И. Зубов, A. Kapsalis, C. Mesaritakis, D. Syvridis, A. Mintairov, D. Livshits. *ФТП*, **47** (10), 1396 (2013).
- [7] E.A. Marcatili. *Bell Syst. Techn. J.*, **48**, 2103 (1969).
- [8] Q. Xu, D. Fattal, R.G. Beausoleil. *Opt. Express*, **16** (6), 4309 (2008).
- [9] J.A. McCaulley, V.M. Donnelly, M. Vernon, I. Taha. *Phys. Rev. B*, **49** (11), 7408 (1994).
- [10] S. Adachi (ed.). (EMIS Datareviews Series No.7). 1993: INSPEC, the Institution of Electrical Engineers (London, UK).
- [11] R.E. Slusher, A.F.J. Levi, U. Mohideen, S.L. McCall, S.J. Pearton, R.A. Logan. *Appl. Phys. Lett.*, **63** (10), 1310 (1993).
- [12] М.Л. Городецкий. *Оптические микрорезонаторы с гигантской добротностью* (М., Физматлит, 2011).
- [13] А.Е. Жуков, М.В. Максимов, А.Р. Ковш. *ФТП*, **46** (10), 1249 (2012).

Редактор Т.А. Полянская

Lasing in microdisks of an ultra-small diameter

A.E. Zhukov^{*+•}, N.V. Kryzhanovskaya^{+•},
M.V. Maximov^{•*}, A.A. Lipovskii^{•*}, A.V. Savelyev^{*+•},
A.A. Bogdanov^{•*}, I.I. Shostak^{*}, E.I. Moiseev^{*},
D.V. Karpov^{*■}, J. Laukkanen[■], J. Tommila[♦]

* St. Petersburg Academic University–Nanotechnology Research and Education Centre of Russian Academy of Sciences,

194021 St. Petersburg, Russia

+ St. Petersburg Scientific Center of Russian Academy of Sciences,

199034 St. Petersburg, Russia

• St. Petersburg State Polytechnical University,
195251 St. Petersburg, Russia

† A.F. Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

■ Institute of Photonics,
University of Eastern Finland,
80130 Joensuu, Finland

♦ Optoelectronics Research Centre,
Tampere University of Technology,
33101 Tampere, Finland

Abstract Modeling and experimental results are presented which demonstrate that room temperature lasing is achieved on the ground-state optical transition of InAs/InGaAs/GaAs quantum dots even in optical microdisk resonators having a diameter as small as 1.5 μm . In 1- μm resonators lasing proceeds at a wavelength of a whispering gallery mode within the first excited-state optical transition.