

Полупроводниковые WGM-лазеры среднего инфракрасного диапазона

© В.В. Шерстнев[¶], А.М. Монахов, А.П. Астахова, А.Ю. Кислякова, Ю.П. Яковлев,
Н.С. Аверкиев, А. Krier⁺, G. Hill^{*}

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

⁺ Lancaster University,
Lancaster, LA1 4YB, UK

^{*} University of Sheffield,
Sheffield S1 3JD, UK

(Получена 22 ноября 2004 г. Принята к печати 6 декабря 2004 г.)

Созданы полупроводниковые лазеры среднего инфракрасного диапазона с дисковым резонатором, работающие на модах шепчущей галереи. Исследованы особенности таких лазеров.

1. Введение

Полупроводниковые лазеры инфракрасного (ИК) диапазона активно исследуются в течение последних десяти лет. Средний ИК диапазон (2–8 мкм) представляет значительный практический интерес, поскольку в этом диапазоне лежат характеристические линии поглощения значительного числа ядовитых и вредных газов и жидкостей, взрывчатых веществ и т.п. Однако преимущества оптического детектирования таких веществ не используются в полной мере из-за отсутствия простых источников когерентного излучения на этот диапазон.

Активной областью полупроводникового лазера, работающего в диапазоне длин волн $\lambda = 2\text{--}4$ мкм, обычно является узкозонный полупроводник. В таких полупроводниках сильны (по сравнению с более широкозонными) процессы безызлучательной рекомбинации, что понижает коэффициент усиления в активной области. При этом в силу условия самовозбуждения генератора $GF = 1$, где G — однопроходный коэффициент усиления, а F — коэффициент возврата энергии в усилитель, возрастают требования к добротности оптического резонатора. В работе [1] был оценен однопроходный коэффициент усиления на длине пробега луча ~ 100 мкм. Получена оценка $G \approx 1.4$, т.е. коэффициент усиления, не достаточный для перехода традиционных полосковых лазеров в режим генерации при комнатной температуре.

В предыдущих работах [2] мы сообщали об исследовании кольцевых лазеров с максимумом излучения на длине волны $\lambda = 3.05$ мкм. Для видимой спектральной области кольцевые лазеры исследовались ранее (см. работы [3] и ссылки в них). Особенностью этих приборов было использование в них дискового резонатора, причем соответствующая мода этого резонатора являлась так называемой „модой шепчущей галереи“ (в дальнейшем для краткости WGM — whispering gallery mode).

WGM дисковых резонаторов изучались как теоретически, так и экспериментально [3]. Было установлено,

что добротность микродисков может превышать величину 10^6 [4]. Однако до сих пор не показано решающего преимущества WGM-лазеров по сравнению с традиционными полупроводниковыми лазерами видимого и ближнего ИК диапазонов.

Причиной, по нашему мнению, является то, что в этом спектральном диапазоне приборы традиционной конструкции работают достаточно хорошо и при комнатной температуре, и большая добротность WGM-резонаторов не является решающим преимуществом по сравнению с присущими WGM-лазерам недостатками: сложностью вывода света из прибора, нестабильностью кольцевого волновода, многочастотным (в общем случае) режимом работы.

В среднем ИК диапазоне лазеров достаточно простой конструкции, работающих при комнатной температуре, просто не существует (недавно сообщалось о квантово-каскадных лазерах [5], работающих при 300 К, но их конструкция весьма сложна). Поэтому увеличение добротности, обеспечиваемое дисковыми резонаторами, позволяет получить прибор, генерирующий, даже когда оптическое усиление в активной области невелико. Кроме того, поскольку длина волны в рассматриваемом диапазоне $\lambda \approx 3$ мкм (~ 1 мкм внутри резонатора), требования к чистоте поверхности образца существенно ниже, и обработка поверхности резонатора может быть сведена к обычной литографии и стандартным методам обработки поверхности.

В данной работе мы рассматриваем WGM-лазеры среднего ИК диапазона, излучающие на длине волны 3–4 мкм при температуре $T = 70\text{--}120$ К. Полученные результаты позволяют надеяться на создание приборов, работающих при комнатной температуре.

2. Образцы и методика эксперимента

Светоизлучающие лазерные диоды были изготовлены на основе двойных гетероструктур (ДГС) $\text{InAsSbP}/\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x/\text{InAsSbP}$, выращенных методом жидкофазной эпитаксии. Для выращивания ДГС была использована

[¶] E-mail: V.SHERSTNEV@mail.ioffe.ru

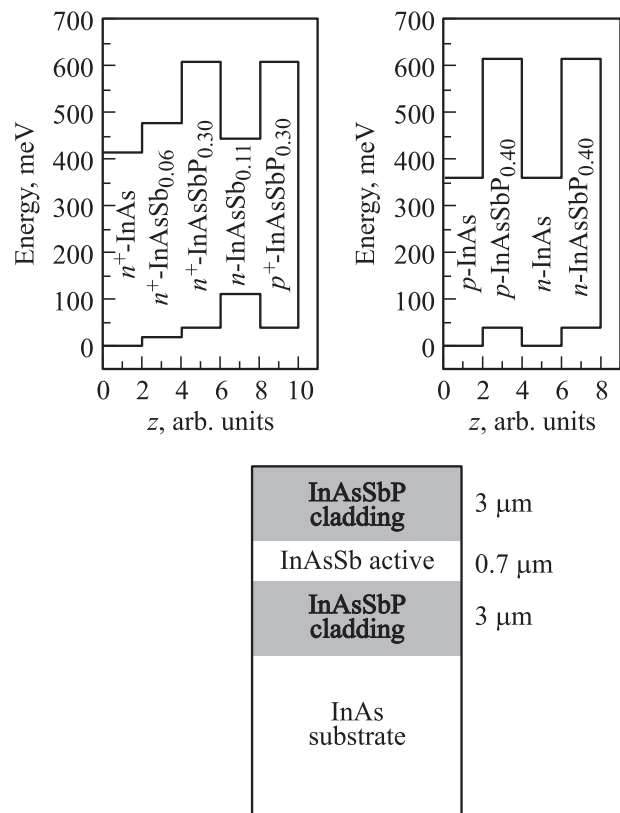


Рис. 1. Схематическое изображение полупроводниковых структур, использованных при создании лазеров. z — координата в направлении роста слоев.

стандартная графитовая кассета. Структуры выращивались на ориентированной в плоскости (100) подложке InAs. Подложки представляли собой прямоугольники размером 18×16 мм с концентрацией легирующей примеси от $2 \cdot 10^{16}$ до $5 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$. Подложки были изготовлены Wafer Technology ltd. Процесс эпитаксиального роста управлялся системой контроля Labview с помощью персонального компьютера. Технологические особенности описаны в работах [6–8].

Активная область ДГС представляла собой твердый раствор $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ с содержанием Sb x , меняющимся от 0 до 0.11. Концентрация носителей в активной области была меньше $5 \cdot 10^{15}$ см $^{-3}$. Такую концентрацию удалось получить благодаря эффекту геттерирования дефектов при легировании активной области иттербием (Yb) с использованием в качестве нейтрального растворителя свинца (Pb). Толщина активной области составляла 0.5–0.7 мкм.

Активная область была заключена между слоями широкозонного твердого раствора InAsSbP n - и p -типа проводимости. Широкозонные области n -типа легировались Sn до концентрации $5 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$, а p -типа — Zn до концентрации $1 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$. Схема типового прибора показана на рис. 1.

Лазерные диоды изготавливались из эпитаксиальных структур с использованием стандартной фотолитогра-

фии и химического ионного травления в газовой среде $\text{CH}_4:\text{H}_2$. Размеры круглой мезы составляли от 100 до 1000 мкм. После травления поверхность мезы пассивировалась с помощью Si_3N_4 . Омические контакты создавались путем термического напыления AuZn: Au на p -слой и AuTe: Au на n -слой. Верхний контакт представлял собой кольцо шириной 30 мкм отстоящее от края мезы на 10 мкм. Кристалл припаивался на корпус TO-49 с помощью In. Излучение собиралось параболическим отражателем.

Микрофотография изготовленного таким образом лазерного диода приведена на рис. 2.

Спектры электролюминесценции лазерных диодов изучались в импульсном и квазинепрерывном режимах. В импульсном режиме длительность импульса (τ) менялась от 50 нс до 30 мкс, а частота следования (f) от 1 до 50 кГц. Через прибор пропускался ток (I) от 0.1 до 10 А. Измерения проводились в температурном интервале от 4 до 300 К.

Излучение лазерного диода, помещенного в криостат с сапфировым окном, собиралось системой флюоритовых линз и направлялось на щель монохроматора. Для изучения модовой структуры спектров использовался монохроматор высокого разрешения (разрешающая способность 1 Å) Monospec 1000, а для измерений, не требующих высокого разрешения, либо требующих большой оптической силы установки, использовался монохроматор DK-480 (CVI Laser Corp.) с разрешением 15 Å.

Излучение регистрировалось охлаждаемым InSb-фотодиодом модели J10D-M204-R04M-60. В качестве предварительного усилителя использовался прибор PA-9 фирмы Judson Technologies. Измерения проводились по схеме синхронного детектирования с использованием прибора Stanford Research SR850.

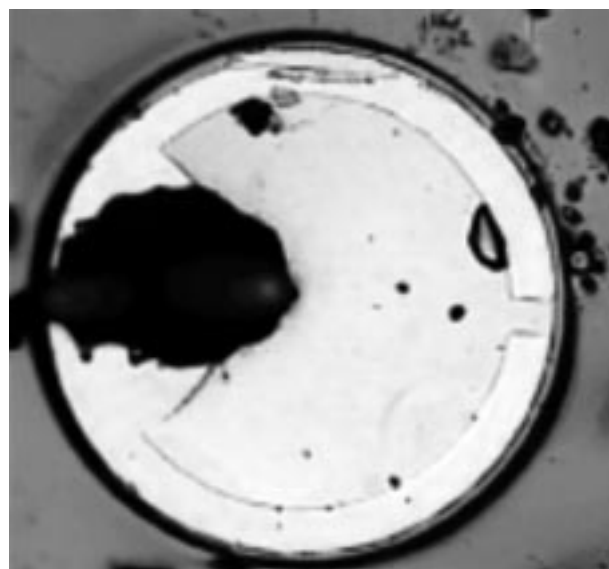


Рис. 2. Микрофотография мезы.

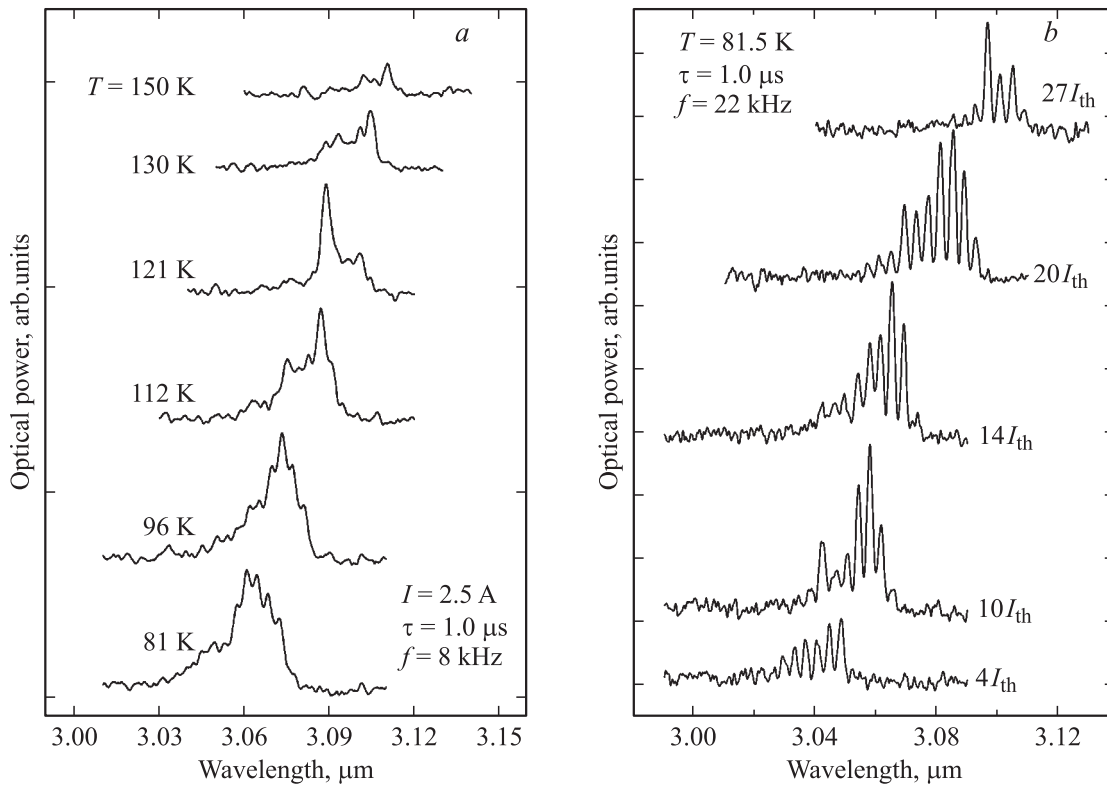


Рис. 3. Температурная (а) и токовая (б) зависимости спектров лазерного излучения прибора V2230R диаметром 200 мкм. $I_{th} = 0.15$ А.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

3.1. Кольцевые лазеры диаметром 200 мкм

В данной работе мы рассмотрим спектры лазерных диодов двух типов: первые — с активной областью на основе InAs, вторые — с активной областью на основе InAs_{0.89}Sb_{0.11}. Приборы первого типа излучали на длине волны $\lambda \approx 3.04$ мкм, а второго на длине волны $\lambda \approx 3.9$ мкм при температуре $T = 77$ К. Были изготовлены приборы первого типа с дисковым резонатором диаметром 200 и 400 мкм, а приборы второго типа — с резонатором диаметром 400 мкм.

На рис. 3 показаны типичные спектры когерентного излучения прибора диаметром 200 мкм. Видно, что излучение имеет многомодовую структуру, причем расстояние между модами составляет $\Delta\lambda \approx 40$ Å.

Чтобы соотнести экспериментальный спектр с предполагаемым спектром WGM-лазера, следует вспомнить, что напряженность z -компоненты электрического поля WGM приближенно описывается уравнением [3]

$$E_z = f(z)J_m\left(rn\frac{\omega_{mN}}{c}\right)e^{im\phi}, \quad (1)$$

где r — расстояние вдоль радиуса, n — показатель преломления; $\omega_{mN} = x_{mN}^N/nR$, x_{mN}^N — N -й корень уравнения $J_m(x) = 0$, $J_m(x)$ — функция Бесселя, R — радиус мезы.

Моды WGM соответствует случаю большого m ($m \gg 1$) и $N \approx 1$. Отличительная особенность WGM заключается в том, что поле в них сосредоточено вблизи стенки резонатора, а также в том, что такие моды слабо затухают внутри резонатора. В рассматриваемом случае резонатора диаметром 200 мкм, длины волны в воздухе 3.04 мкм и показателя преломления $n \approx 3.5$ величина m оказывается равной ~ 600 .

Межмодовое расстояние для рассматриваемого резонатора легко оценить, воспользовавшись асимптотическим выражением для корней функций Бесселя с большим индексом m и $N = 1$:

$$x_m^1 \approx m + o(m^{1/3}).$$

Используя это выражение и выразив m через λ , получаем для межмодового расстояния

$$\Delta\lambda_{WGM} = \frac{\lambda^2}{2\pi Rn}, \quad (2)$$

что дает для нашего случая $\Delta\lambda = 43$ Å — в отличном согласии с экспериментом.

Другой особенностью рассматриваемых лазерных диодов является то, что, в отличие от обычных лазеров с резонатором Фабри–Перо, они работают при токе, в 27 раз превышающем пороговый, ($I = 27I_{th}$) и продолжают работать вплоть до 150 К (стандартный полосковый лазер из того же материала прекращает работать при 110 К).

Прежде чем обсуждать зависимость выходной оптической мощности лазера от тока накачки (внешний квантовый выход), следует обратить внимание на то, что плотность тока в круглой мезе с кольцевым контактом крайне неоднородно распределена, и выяснить, каково это распределение в образце заданной формы.

Следует отметить, что лазерный диод — это нелинейное устройство, не подчиняющееся закону Ома. (Более того, поскольку активной областью является двойной гетеропереход с двойными заряженными слоями на границах, стандартная теория $p-n$ -перехода также неприменима к такому устройству). Тем не менее в области рабочих напряжений вольт-амперная характеристика приближенно аппроксимируется прямой, и распределение плотности тока можно рассчитать, полагая, что в реальных приборах имеется некоторое дополнительное падение напряжения на активной области, которое не может быть рассчитано в рамках линейной теории.

В такой постановке задача о расчете распределения плотности тока сводится к решению стандартного уравнения

$$\nabla(\sigma \nabla \varphi) = 0$$

с граничным условием

$$\iint_{\partial\Omega} j_n dS = I$$

вместо задания потенциала на контактах (при этом потенциал на контактах считается постоянным). Здесь I — ток через образец, j_n — нормальная компонента плотности тока, σ — проводимость, различная для разных областей, φ — потенциал, а интегрирование ведется по любой поверхности $\partial\Omega$, рассекающей образец на две части и проходящей между контактами.

Рассчитанное таким образом распределение нормальной компоненты плотности тока $j_n \equiv j_z$ на границе активной области показано на рис. 4. Там же приведено

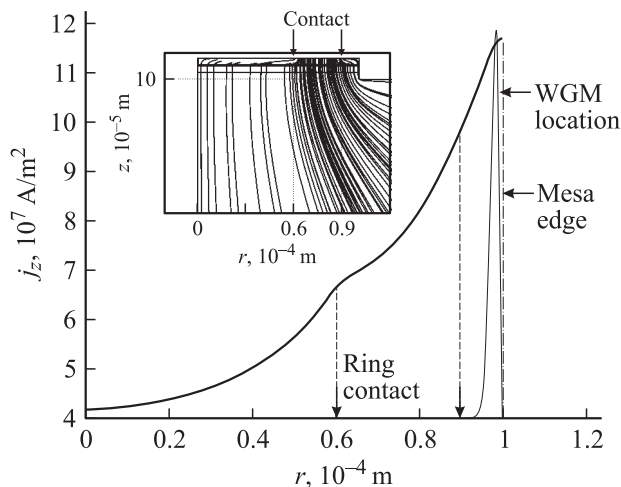


Рис. 4. Распределение плотности тока по радиусу круглой мезы с кольцевым контактом. На вставке — картина распределения линий тока.

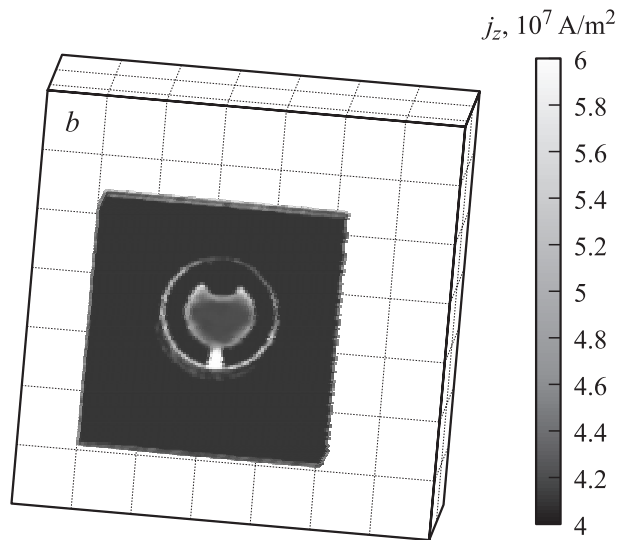
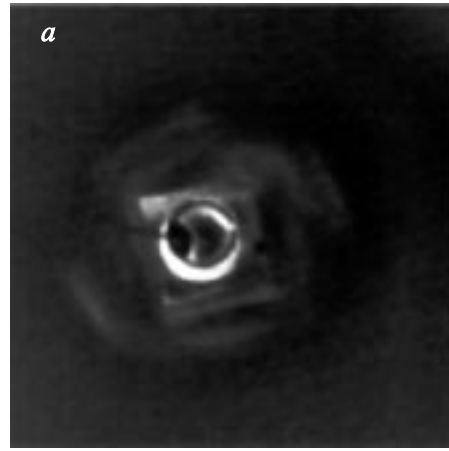


Рис. 5. ИК фотография светодиода (а) и картина рассчитанного распределения плотности тока (б).

положение WGM относительно края образца. На вставке показана картина линий тока, поясняющая, каким образом устанавливается такое распределение. Из рис. 4 видно, что плотность тока имеет максимум как раз там, где локализована WGM.

На рис. 5 показано рассчитанное распределение плотности тока и фотография рассматриваемого устройства в режиме светодиода, сделанная с помощью ИК камеры (комнатная температура). Поскольку интенсивность света пропорциональна нормальной компоненте плотности тока, данная фотография свидетельствует по крайней мере о качественном согласии расчета с экспериментом.

На рис. 6 показана зависимость выходной мощности лазера от плотности тока в активной области (для определенности отложена средняя плотность тока в кольце шириной ~ 10 мкм, расположенном на крае мезы). На этом же рисунке показана аналогичная зависимость для полоскового лазера из того же материала (для него плотность тока можно получить, просто деля полный ток на площадь контакта) и для кольца диамет-

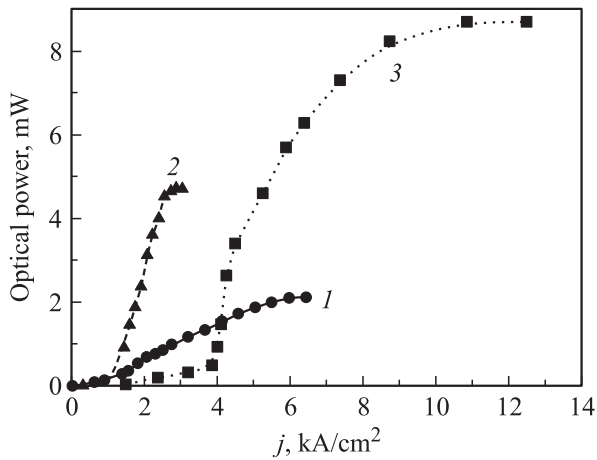


Рис. 6. Зависимость выходной мощности кольцевых лазеров диаметром 200 (1), 400 мкм (2) и полоскового лазера (3) от плотности тока j в активной области.

ром 400 мкм. Последний результат будет обсуждаться в следующем разделе.

Из рис. 6 очевидно, что пороговый ток кольцевого лазера диаметром 200 мкм в несколько раз меньше порогового тока традиционного полоскового лазера, что подтверждает тезис о высокой добротности дискового резонатора. С другой стороны, наклон кривой существенно больше у полоскового лазера, и это означает, что внешний квантовый выход такого прибора больше.

Малое экспериментальное значение квантового выхода кольцевого лазера, на наш взгляд, объясняется несколькими причинами. Во-первых, поскольку никакого устройства для выведения света из резонатора не использовалось, скорее всего, измерялась лишь часть выходной оптической мощности, это привело к занижению внешнего квантового выхода. Во-вторых, поскольку WGM локализована вблизи границы мезы, где сосредоточены, в силу технологических обстоятельств, центры безызлучательной рекомбинации, внутренних, а соответственно и внешний, квантовый выход WGM-лазера действительно должен оказаться меньше по сравнению с полосковым лазером. Вопрос в том, какой из этих двух факторов преобладает, требует дальнейшего изучения.

3.2. Кольцевые лазеры диаметром 400 мкм

Помимо лазеров с мезой диаметром 200 мкм нами были изготовлены кольцевые лазеры диаметром 400 мкм с активной областью из InAs (рис. 7, 8) и $\text{InAs}_{0.89}\text{Sb}_{0.11}$ (рис. 9). Отличительной особенностью спектров таких приборов является то, что, в отличие от лазеров диаметром 200 мкм, в спектре излучения видны отдельные моды высокой интенсивности (см. рис. 8, 9). Спектральное расстояние между модами составляет от 40 до 150 \AA . При этом лазер на основе InAs работает в квазиодномодовом режиме вплоть до двукратного превышения порогового тока.

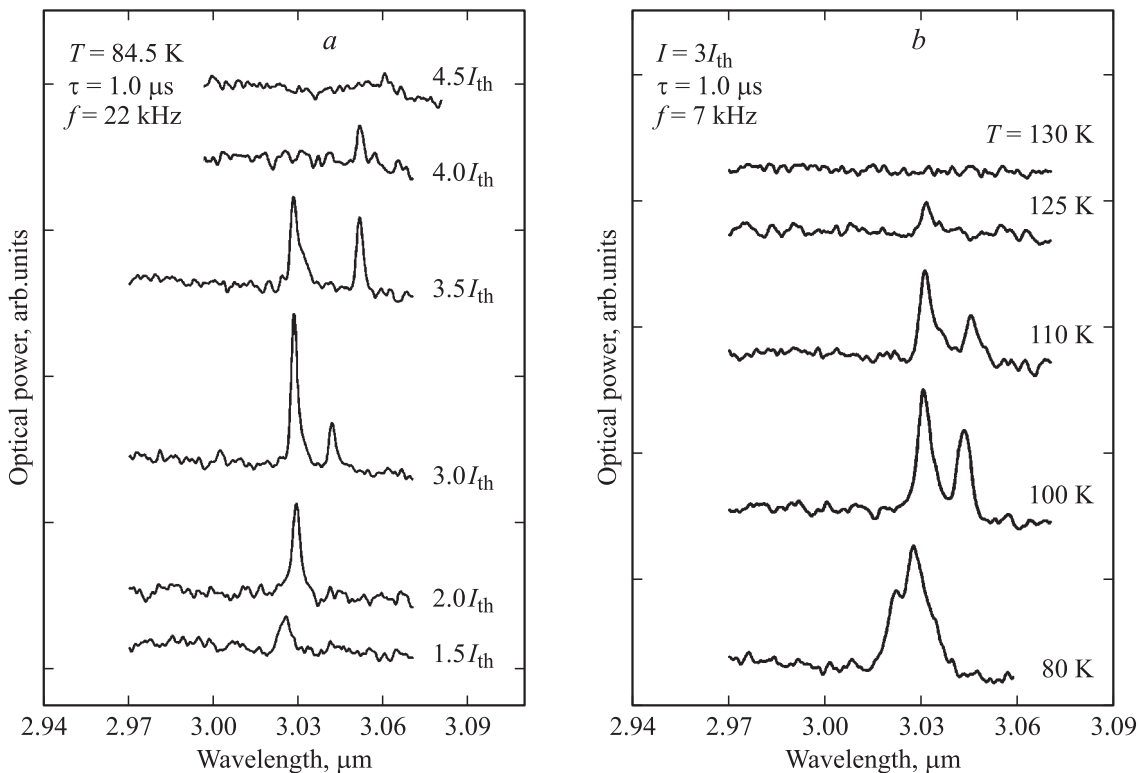


Рис. 7. Токвая зависимость положения мод (а) и температурная зависимость (б) спектра излучения прибора V2230R диаметром 400 мкм с активной областью на основе InAs. $I_{\text{th}} = 0.65 \text{ A}$.

При детальном изучении спектров лазеров диаметром 400 мкм в них обнаруживаются и другие моды, подавленные относительно главной моды. Межмодовое расстояние для ближайших мод составляет $\sim 17 \text{ \AA}$ (см. рис. 8), что совпадает с оценкой межмодового расстояния WGM, полученного по формуле (2).

Исследование зависимости выходной мощности от плотности тока в активной области по методике, описанной выше, показывает (см. рис. 6), что эта зависимость для лазеров диаметром 400 мкм существенно отличается от аналогичной зависимости для лазеров диаметром 200 мкм. Все это позволяет предположить, что режим работы лазера 400 мкм отличается от режима работы лазера 200 мкм, причем это отличие связано с размером резонатора, а не со структурой активной области, поскольку приборы, сделанные на основе разных материалов активной области и излучающие на существенно различающихся длинах волн ведут себя аналогичным образом.

Причиной такого различия в поведении WGM-лазеров разного размера может быть как то обстоятельство, что на самом деле моды резонатора, генерация которых происходит в кольце 400 мкм, не являются WGM, так и развитие нелинейных процессов в больших дисках, приводящих к преимущественной генерации на отдельных WGM. Против первого предположения говорит простая оценка размера резонатора с межмодовым расстоянием $\Delta\lambda$,

$$L = \frac{\lambda^2}{2n\Delta\lambda},$$

которая дает величину $\sim 80\text{--}150$ мкм. В круглом резонаторе диаметром 400 мкм чем-то выделенная область такого размера отсутствует. Кроме того, пики, соответствующие WGM, хоть и подавленные, видны в спектрах (см. рис. 8).

Таким образом, по нашему мнению, описанное различие в поведении WGM-лазеров 200 и 400 мкм связано

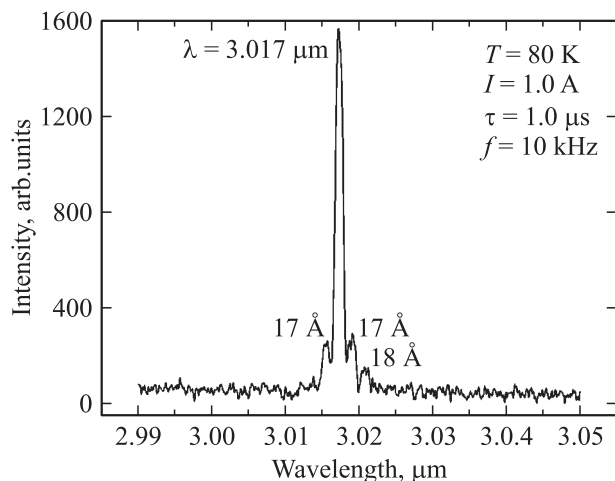


Рис. 8. Спектр излучения с высоким разрешением для прибора V2133R диаметром 400 мкм с активной областью на основе InAs. $I_{th} = 0.65$ А.

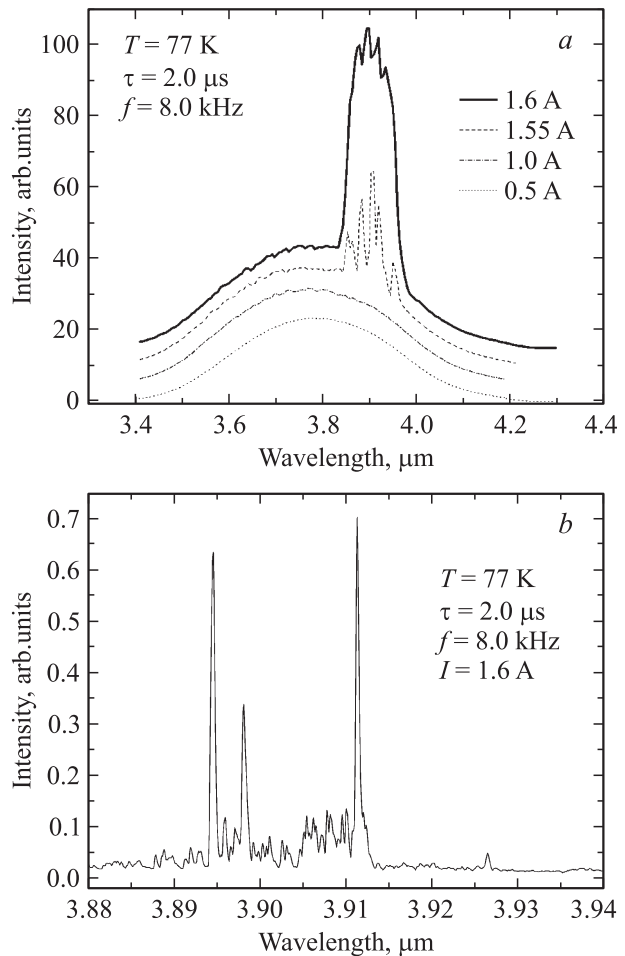


Рис. 9. Токовая зависимость положения мод (a) и модовая структура излучения (b) прибора V2346-2 диаметром 400 мкм с активной областью на основе InAsSb.

с развитием нелинейных процессов при увеличении диаметра резонатора. К сожалению, мы не смогли пока исследовать это явление более детально.

4. Заключение

Впервые созданы WGM-лазеры, работающие в среднем ИК диапазоне на длинах волн от 3 до 4 мкм при температурах вплоть до 150 К, мощность излучения этих лазеров составляет единицы милливатт. Пороговый ток таких приборов в несколько раз меньше порогового тока традиционных полосковых лазеров, имеющих ту же структуру, что подтверждает существующее представление о высокой добротности дисковых резонаторов. Показано, что эти лазеры работают вплоть до токов $27I_{th}$.

Обнаружено изменение спектра лазерного излучения при увеличении размера дискового резонатора. Природа этого явления требует дальнейшего изучения.

Полученные результаты показывают, что WGM-лазеры являются перспективными приборами для ИК спектроскопии.

Работа частично поддержана программами Министерства науки и образования и научной программой СПбНЦ РАН.

Список литературы

- [1] A.M. Monakhov, A. Krier, V.V. Sherstnev. *Semicond. Sci. Technol. (UK)*, **19** (3), 480 (2004).
- [2] V.V. Sherstnev, A. Krier, A.M. Monakhov, G. Hill. *Electron. Lett.*, **39**, 916 (2003); V.V. Sherstnev, A.M. Monakhov, A. Krier, G. Hill. *Appl. Phys. Lett.*, **77**, 3908 (2000); A. Krier, D.A. Wright, V.V. Sherstnev, A.M. Monakhov. *Abstracts Book MIOMD-VI. Sixth Int. Conf. Mid-Infrared Optoelectronics Materials and Devices* (St. Petersburg, Russia, 2004) p. 72.
- [3] N.C. Frateschi, A.F.J. Levi. *Appl. Phys. Lett.*, **66**, 2932 (1995); R.P. Wang, M. Dumitrescu. *J. Appl. Phys.*, **81**, 3391 (1997); J.R. Davies, J.T. Mendonca. *Phys. Rev. E*, **62**, 7168 (2000).
- [4] D.A. Cohen, M. Hossein-Zadeh, A.F.J. Levi. *Sol. St. Electron.*, **45**, 1577 (2001).
- [5] A.N. Baranov, R. Teissier, D. Barate, A. Vicet, C. Alibert, C. Renard, X. Marcadet, M. Garcia, C. Sirtori. *Abstracts Book MIOMD-VI. Sixth Int. Conf. Mid-Infrared Optoelectronics Materials and Devices* (St. Petersburg, Russia, 2004) p. 3.
- [6] A. Krier, V.V. Sherstnev. *J. Appl. Phys.*, **33** (2), 101 (2000).
- [7] A. Krier, H.H. Gao, V.V. Sherstnev. *IEE Proc.: Optoelectron.*, **147** (3), 217 (2000).
- [8] A. Krier, V.V. Sherstnev. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **36** (13), 1484 (2003).

Редактор Л.В. Шаронова

Semiconductor WGM lasers for mid-infrared spectral range

V.V. Sherstnev, A.M. Monakhov, A.P. Astakhova,
A.Yu. Kislyakova, Yu.P. Yakovlev, N.S. Averkiev,
A. Krier⁺, G. Hill^{*}

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

⁺ Lancaster University,
Lancaster, LA1 4YB, UK

^{*} University of Sheffield,
Sheffield S1 3JD, UK

Abstract Whispering gallery mode (WGM) semiconductor lasers for mid-IR spectral range have been created. The peculiar properties of such devices have been investigated.