

06

Экспериментальное наблюдение мод шепчущей галереи в лазерах с усеченным дисковым резонатором

© А.М. Монахов, В.В. Шерстнев, А.П. Астахова,
Е.А. Гребенщикова, Ю.П. Яковлев, G. Boissier,
R. Teissier, А.Н. Баранов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
Institut d'Electronique du Sud (IES), Université Montpellier 2, CNRS, IES
(UMR CNRS 5214), 34095 Montpellier, France
E-mail: v.sherstnev@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 20 апреля 2008 г.

Экспериментально обнаружены моды шепчущей галереи в лазерах с усеченным дисковым резонатором (полдиска и четверть диска), работающих на длине волны 2.0–2.4 μm при комнатной температуре. Теоретически рассмотрена возможность генерации WG мод в секторальном резонаторе. Установлено, что для резонатора, имеющего форму полного диска или половины диска, межмодовое расстояние одинаковое, а для четвертьдиска удваивается. Предложен новый способ вывода излучения для WGM лазеров.

PACS: 85.30.-z, 42.79.-e, 42.55.Px

Полупроводниковые лазеры, работающие в средней инфракрасной (ИК) области спектра (2–5 μm), представляют большой интерес для практического применения. Они служат основой для абсорбционного высокоточного экспресс-анализа состава различных газовых сред [1].

Лазеры на основе мод шепчущей галереи (whispering gallery mode, сокращенно — WGM) в наше время привлекают к себе большое внимание [2–7].

В данной работе мы сообщаем об экспериментальном наблюдении WGM генерации в лазере с усеченным дисковым резонатором. Этот резонатор представляет собой сектор цилиндра и схематично показан на рис. 1. Решение уравнения Гельмгольца для этого резонатора сходно с решением уравнения для полного цилиндра. Для упрощения рассмотрим ТН моду в металлическом резонаторе показанном на рис. 1.

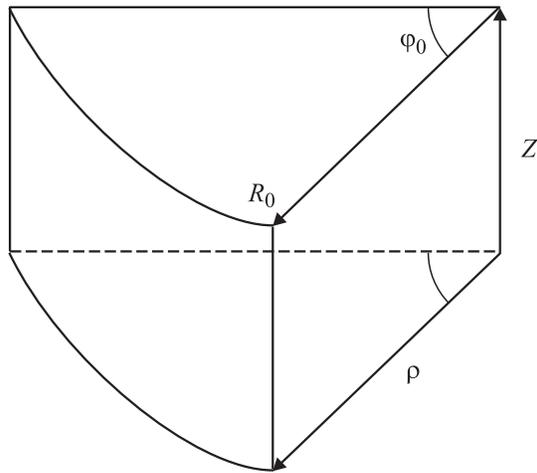


Рис. 1. Схематическое изображение секторного дискового резонатора.

В этом случае все компоненты электрических и магнитных полей могут быть выражены через E_z компоненту электрического поля, которая удовлетворяет уравнению Гельмгольца.

Разделением переменных в цилиндрических координатах это уравнение сводится к трем обычным дифференциальным уравнениям [8]:

$$E_z = Z(z)\Phi(\varphi)R(\rho),$$

$$\frac{d^2Z}{dz^2} = -k^2Z,$$

$$\frac{d^2\Phi}{d\varphi^2} = -\nu^2\Phi,$$

$$\frac{d^2R}{d\rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{dR}{d\rho} + \left(\frac{\omega^2}{c^2} - \frac{\nu^2}{\rho^2} \right) R = 0 \quad (1)$$

с граничными условиями

$$Z(0) = Z(h) = R(R_0) = \Phi(0) = \Phi(\varphi_0) = 0, \quad (2)$$

где ω — собственная частота резонатора, h — его высота. Единственное различие от обычного WGM уравнения в цилиндре заключается в последнем равенстве в формуле (2).

Решением уравнений (1, 2) является $Z = A \sin(kz)$, $R = J_\nu\left(\frac{\omega}{c} \rho\right)$, $\Phi = \sin(\nu\varphi)$, где ν получается из уравнения $\sin(\nu\varphi_0) = 0$ и ω из

$$J_\nu\left(\frac{\omega}{c} R_0\right) = 0. \quad (3)$$

Видно, что ν может быть не целым числом. Структура решения уравнений (1, 2) очень похожа на WGM — решение в цилиндре с двумя различиями: индекс ν функции Бесселя может быть не целым числом, а вместо бегущей волны образуются стоячие волны.

Для сравнения с экспериментом, описанным ниже, интересно рассчитать межмодовое расстояние для $\varphi_0 = \pi$ и $\varphi_0 = \pi/2$. Если $\varphi_0 = \pi$, то $\nu = m$ является положительным целым числом и уравнение (3) совпадает с уравнением для WGM в цилиндре. Это значит, что межмодовое расстояние в длинах волн $\Delta\lambda$ для полудискового резонатора вблизи длины волны λ такое же, как и полного дискового резонатора, и для больших m

$$\Delta\lambda \approx \frac{\lambda^2}{2\pi R_0}. \quad (4)$$

Нестрого говоря, это совпадение вызвано тем, что оптическая длина замкнутого луча в диске и полудиске совпадают.

Для четвертьдискового резонатора уравнение (3) сводится к

$$J_{2m}\left(\frac{\omega}{c} R_0\right) = 0,$$

где m — целое положительное число. Межмодовое расстояние для достаточно больших индексов m может быть получено из известной асимптотической оценки положения первого корня функции Бесселя: $J_m(x) = 0 \Rightarrow x \cong m \Rightarrow \lambda \cong 2\pi R_0/m$ и

$$\Delta\lambda \cong 2\pi R_0 \left(\frac{1}{m} - \frac{1}{m+2} \right) \cong 2 \frac{\lambda^2}{2\pi R_0}, \quad (5)$$

т. е. межмодовое расстояние в четвертьдисковом резонаторе удвоено.

Для проверки полученных результатов были выращены структуры методом молекулярно-пучковой эпитаксии на установке RIBER Comrast 21E на подложке GaSb (100) n -типа. Активная область толщиной 856 nm, излучавшая на длинах волн 2.0 и 2.4 μm , состояла из двух напряженных квантовых ям разного состава GaInAsSb, разьединенных

слоем AlGaAsSb толщиной 30 nm. Волноводные слои, изготовленные из $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}_{0.02}\text{Sb}_{0.98}$ имели толщину 400 nm. Активная область преднамеренно не легировалась. Волновод был ограничен широкозонными слоями p (Be)- и n (Te)- $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}_{0.08}\text{Sb}_{0.92}$ толщиной 1.0 μm . Широкозонные слои n -типа и p -типа легировались до концентрации носителей заряда $2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. С внешней стороны широкозонных слоев были выращены два тонких варизонных слоя AlGaAsSb толщиной 100 nm для улучшения инжекции носителей заряда в активную область. В качестве верхнего контактного слоя структуры выращивался слой GaSb p -типа толщиной 475 nm, легированный до $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Более подробно процесс выращивания лазерной структуры описан в статье [9].

Для формирования омических контактов методом термического вакуумного напыления наносили Cr–Au–Ni–Au на эпитаксиальный слой. Нижний слой хрома служил для улучшения адгезии последующих слоев. Со стороны подложки наносился сплошной многослойный Cr–Au–Ni–Au контакт методом термического вакуумного напыления. После напыления и осаждения структура подвергалась термообработке в среде водорода для сплавления металлических слоев.

Из созданных структур методом фотолитографии и жидкостного химического травления изготавливались лазерные чипы с резонатором цилиндрической формы диаметром 300 μm и 200 μm высотой 15 μm . Из полученных чипов методом раскалывания изготавливались симметричные лазерные кристаллы с резонаторами в форме полудиска и четвертьдиска. Излучение собиралось параболическим отражателем. Была собрана и измерена серия лазеров с различной формой резонатора (полный диск, полудиска и четвертьдиска).

Для излучения модовой структуры спектров лазеров, работающих на длине волны 2.0 μm , использовался Фурье спектрометр марки FTIR Nicolet Nexus 870 с охлаждаемым InSb-фотодиодом, а для лазеров, работающих на длине волны 2.4 μm — монохроматор DK-480.

Спектры лазеров с резонаторами в форме полудиска и четвертьдиска, работающих на длине волны 2.0 μm показаны на рис. 2. Для сравнения также показан спектр лазера с полным дисковым резонатором. Видно, что межмодовое расстояние для лазеров с полным дисковым и полудисковыми резонаторами (измеренное — 1.17 nm, расчетное — 1.25 nm) и для четвертьдискового (измеренное — 2.35 nm, расчетное — 2.50 nm) хорошо согласуется со значениями, получен-

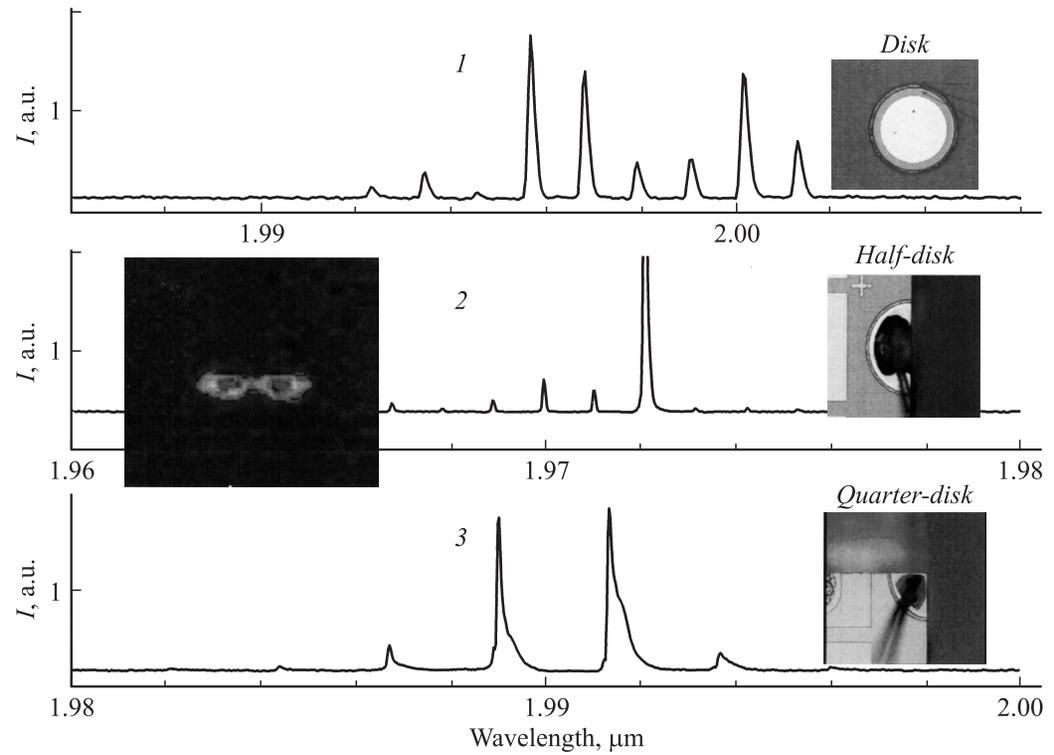


Рис. 2. Спектры WGM лазеров, работающие на длине волны $2.0\ \mu\text{m}$ при комнатной температуре. 1 — спектр лазера с дисковым резонатором, 2 — спектр лазера с полудисковым резонатором, 3 — спектр лазера с четвертьдисковым резонатором. На вставках (справа) приведены микрофотографии лазеров (вид сверху). На вставке (слева) на графике 2 приведена микрофотография излучения лазера, сделанная инфракрасной камерой.

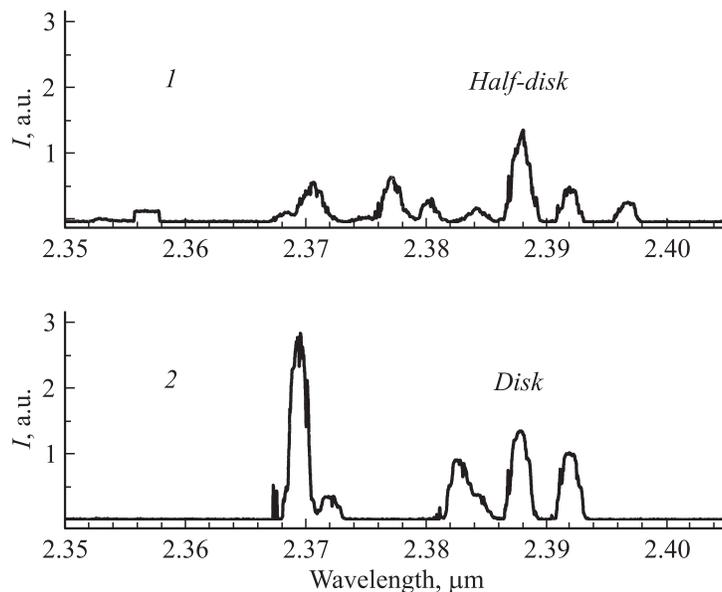


Рис. 3. Спектры WGM лазеров, работающих на длине волны $2.4\mu\text{m}$ при комнатной температуре. 1 — спектр лазера с полудисковым резонатором, 2 — спектр лазера с дисковым резонатором.

ными по формулам (4–5). На врезке к графику 2 (слева) приведена микрофотография скола полудиска, сделанная инфракрасной камерой, на которой просматривается два луча по краям полудиска.

На рис. 3 приведен спектр WGM лазера с полудисковым резонатором, работающим на длине волны $2.4\mu\text{m}$ при комнатной температуре (график 1). Межмодовое расстояние этого лазера хорошо совпадает с межмодовым расстоянием полного диска, показанном на нижнем графике.

Использование в WGM лазерах усеченного дискового резонатора, позволяет решить одну из главных проблем дисковых лазеров — вывод излучения, а также легко изготовить двухлучевые источники когерентного света (как однонаправленные, так и разнонаправленные), перспективные для создания портативных лазерных спектрометров. Отметим, что при прочих равных условиях полная выходная оптическая

мощность в одном направлении в рассматриваемых приборах удваивается.

Таким образом, впервые продемонстрированы WG моды в лазерах с полудисковым и четвертьдисковым резонатором, работающих на длине волны 2.0–2.4 μm при комнатной температуре. Теоретически рассмотрена возможность генерации WG мод в секторном резонаторе. Показано, что межмодовое расстояние для полудискового и полного дискового резонатора одинаковое, а для четвертьдискового удваивается. Предложен новый способ вывода излучения для WGM лазеров.

Работа частично поддержана гратами РФФИ 07-02-13616-офи_ц, 07-02-92170-НЦНИ_а и 08-02-12118-офи.

Список литературы

- [1] *Astakhova A.P., Imenkov A.N., Danilova T.N., Sherstnev V.V., Yakovlev Yu.P.* // Spectrochimica Acta, Part A: Molecular and Biomolecular Spectr. 2007. V. 66, Issues 4–5. P. 824.
- [2] *Sherstnev V.V., Krier A., Monakhov A.M., Hill G.* // Electron. Lett. 2003. V. 39. P. 916.
- [3] *Шерстнев В.В., Монахов А.М., Астахова А.П., Кислякова А.Ю., Яковлев Ю.П., Аверкиев Н.С., Krier A., Hill G.* // ФТП. 2005. Т. 39. В. 9. P. 1087.
- [4] *Averkiev N.S., Sherstnev V.V., Monakhov A.M., Grebenshikova E.A., Kislyakova A.Yu., Yakovlev Yu.P., Krier A., Wright D.A.* // Low Temperature Physycs. 2007. V. 33. N 2–3. P. 283.
- [5] *Malko A.V., Mikhailovsky M.A., Petruska M.A., Hollingsworth J.A., Htoon H., Bawendi M.G., Klimo V.I.* // Appl. Phys. Lett. 2002. V. 81. N 7. P. 1303.
- [6] *Lee P., Lu T., Tsai F., Lu T.* // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 89. P. 231111.
- [7] *Xia J.S., Nemoto K., Ikegami Y., Shiraki Y., Usami N.* // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 91. P. 011104.
- [8] *Rayleigh J.W.S.* // Phil. Mag. 1910. V. 20. P. 1001.
- [9] *Yarekha D.A., Glastre G., Perona A., Rouillard Y., Genty F., Skouri E.M., Boissier G., Grech P., Joullie A., Alibert C., Baranov A.N.* // Electron. Lett. 2000. V. 36. N 6. P. 537.