

06;07

Полупроводниковый WGM-лазер с кольцевым резонатором, работающий при комнатной температуре

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

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 24 марта 2009 г.

Созданы инфракрасные полупроводниковые WGM-лазеры с кольцевым и дисковым резонатором (с внешним диаметром резонатора 300, 200 и 100 μm), работающие на длине волны 2.4 μm при комнатной температуре в импульсном режиме. Проведены сравнительные исследования спектральных и пороговых характеристик лазеров и показано, что: кольцевые лазеры, как и дисковые, работают на модах шепчущей галереи, спонтанное излучение в кольцевых лазерах почти на порядок меньше, чем в дисковых лазерах за счет исключения из рекомбинации центральной части дискового лазера, пороговая плотность тока кольцевых лазеров незначительно превышает значение порогового тока дисковых лазеров за счет как возрастания плотности тока к краям дискового и кольцевого лазеров, так и появления поверхностных токов утечки на внутренней поверхности кольцевого лазера.

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

Лазеры, работающие на модах шепчущей галереи (whispering gallery mode — WGM), привлекают к себе большое внимание в связи с существенно более высокой добротностью резонатора, имеющего круглую форму, по сравнению с традиционными полосковыми резонаторами Фабри-Перо [1–7]. В WGM-лазере, имеющем резонатор в форме диска, наблюдается следующая особенность: когерентное излучение генерируется в активном слое гетероструктуры в очень тонком слое, прилегающем к внешнему краю диска [3,5,6]. При этом

практически все электрическое поле сосредоточено в очень узкой области вблизи границы диска. В этой связи для снижения порогового тока WGM-лазеров представляется перспективным использование резонатора в виде кольца, в котором по сравнению с дисковым резонатором удалена часть, не участвующая в формировании лазерного излучения. Сравнение характеристик нескольких WGM-лазеров, излучающих в спектральном диапазоне 3–3.5 μm при криогенных температурах, не выявило преимуществ кольцевых резонаторов перед дисковыми [5].

В данной работе мы приводим систематическое сравнительное исследование дисковых и кольцевых WGM-лазеров, работающих в более коротковолновом диапазоне (2–2.4 μm) при комнатной температуре.

В случае, когда ширина кольцевой мезы много больше длины волны в веществе, WGM-моды такого резонатора не отличаются от мод дискового резонатора. Для кольцевого резонатора с нулевыми условиями на внутреннем и внешнем кольце, что является хорошим приближением в случае большого контраста показателя преломления внутри и снаружи кольца, моды резонатора являются корнями уравнения

$$J_m(ax)Y_m(bx) - J_m(bx)Y_m(ax) = 0, \quad (1)$$

где a и b — внешний и внутренний радиусы кольца, $x = \omega/c$, а J_m и Y_m — функции Бесселя и Неймана порядка m соответственно. Для больших m ($m > 100$) первый корень $J_m(ax)$ и $Y_m(ax)$ имеет одинаковую асимптотику, так что (1) для больших m эквивалентно $J_m(ax) = 0$, что в точности совпадает с уравнением WGM-мод в дисковом резонаторе радиусом a . Второе решение (1)

$$J_m(bx) = 0 \quad (2)$$

соответствует решениям, локализованным на расстоянии меньшем, чем b , и не интересно для нас.

Для решения поставленной задачи была выращена структура методом молекулярно-пучковой эпитаксии на установке RIBER Comtract 21E на подложке GaSb(100) n -типа. Активная область толщиной 850 nm состояла из двух напряженных квантовых ям состава $\text{Ga}_{0.65}\text{In}_{0.35}\text{As}_{0.11}\text{Sb}_{0.89}$ толщиной 10 nm, разъединенных слоем $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}_{0.02}\text{Sb}_{0.98}$ 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

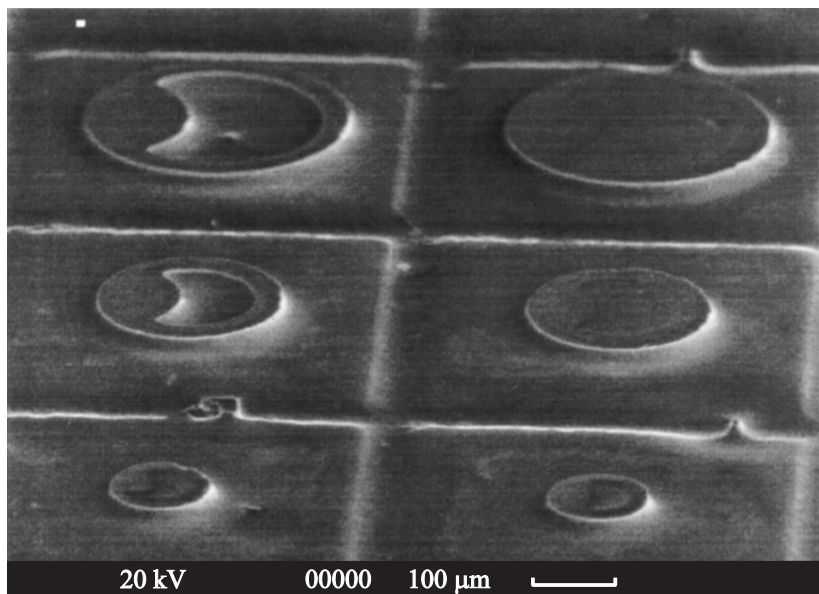


Рис. 1. Микрофотография чипов WGM-лазеров с резонаторами в виде кольца (левый ряд) и диска (правый ряд) диаметром 300, 200 и 100 μm (общий вид).

широкозонными слоями $p(\text{Be})$ - и $n(\text{Te})\text{-Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}_{0.08}\text{Sb}_{0.92}$ толщиной 1.0 μm . Более подробно процесс выращивания лазерной структуры описан в [8].

Из выращенной структуры были сформированы лазерные чипы с резонаторами двух видов — диска и кольца. Для этого применялся метод фотолитографии с последующим жидкостным химическим травлением. В результате травления в селективном травителе были сформированы лазерные чипы с кольцевым резонатором (рис. 1, левый ряд) и дисковым резонатором (рис. 1, правый ряд) с высотой резонатора 18 μm и с различными диаметрами внешней окружности (рис. 1). Ширина кольца кольцевого резонатора составила 30 μm . При этом боковые поверхности резонаторов имели выпуклые участки как снаружи, так и внутри кольца (в случае кольцевого резонатора). Местонахождение этих выпуклых участков соответствовало расположению активного слоя выращенной

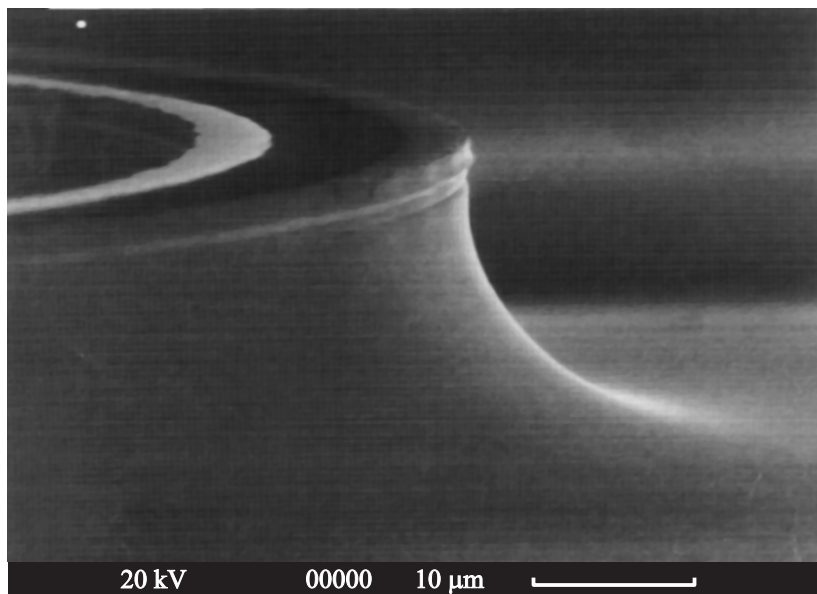


Рис. 2. Микрофотография WGM-лазера с резонатором в виде кольца диаметром $300\ \mu\text{m}$ (вид сбоку).

структуры и по форме напоминало пагоду. Лазерный чип с резонатором в форме кольца показан на фотографии, полученной с помощью электронного микроскопа (рис. 2).

Верхний контакт для обоих типов лазеров представлял собой кольцо (с внешним диаметром — 280, 180 или $80\ \mu\text{m}$) шириной $10\ \mu\text{m}$, отстоящий от краев резонатора на $10\ \mu\text{m}$. Кристалл припаивался на корпус ТО-18 с помощью индия. Излучение собиралось параболическим отражателем. Была собрана и измерена серия лазеров, все они имели диодные характеристики с напряжением отсечки $\sim 0.65\ \text{V}$ при комнатной температуре и дифференциальное сопротивление порядка $0.8\text{--}1.0\ \Omega$.

Спектры электролюминесценции WGM-лазеров изучались в импульсном режиме. Длительность импульса менялась от $30\ \text{ns}$ до $2\ \mu\text{s}$, частота следования — от 1 до $250\ \text{kHz}$. Через лазеры пропускался

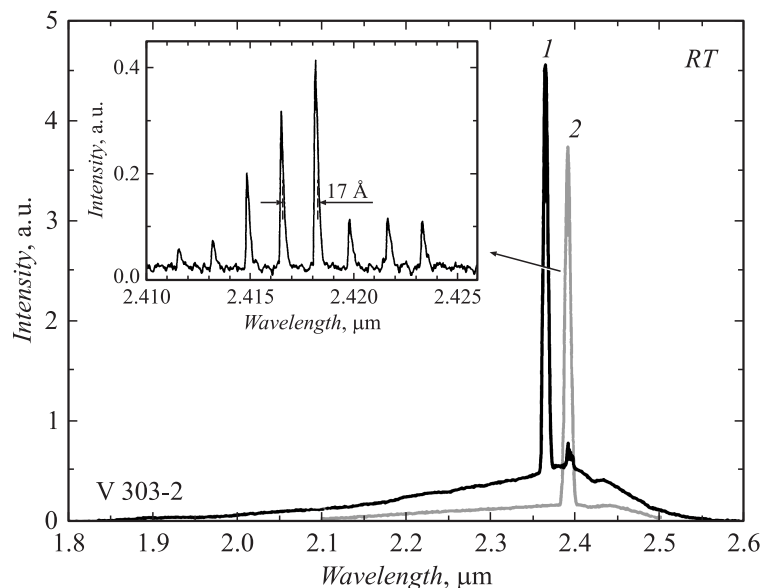


Рис. 3. Спектры спонтанного и когерентного излучения WGM-лазеров (спектральное разрешение 150 \AA) с резонатором в виде диска (1) и кольца (2) и внешним диаметром $300 \mu\text{m}$, измеренные в импульсном режиме при токе накачки в $1.2 I_{th}$ (длительность импульса 500 ns и частота повторения импульса 32 kHz). На вставке приведен спектр когерентного излучения WGM-лазера с резонатором в виде кольца, измеренный (спектральное разрешение 2 \AA) в импульсном режиме (длительность импульса 40 ns и частота повторения импульса 210 kHz) при токе накачки 230 mA при комнатной температуре.

ток величиной от 0.05 до 5 A . Измерения проводились при комнатной температуре.

Для изучения модовой структуры спектров лазеров использовался Фурье-спектрометр марки FTIR Nicolet Nexus 870 с охлаждаемым InSb-фотодиодом.

На рис. 3 показаны типичные спектры спонтанного и когерентного излучения WGM-лазеров с резонатором в виде диска (рис. 3, спектр 1) и кольца (рис. 3, спектр 2) с внешним диаметром $300 \mu\text{m}$. Измерения проводились в импульсном режиме при токе накачки в $1.2 I_{th}$ (дли-

тельность импульса 500 ns и частота повторения импульса 32 kHz). Как хорошо видно из рис. 3, при использовании кольцевого резонатора интегральная спонтанная составляющая спектра излучения уменьшается почти в десять раз. В работе [9] нами сообщалось об исследовании WGM-лазеров с резонатором в виде диска. Ниже мы приведем краткий анализ спектральных характеристик лазеров с кольцевым резонатором.

На вставке рис. 3 для примера показан спектр когерентного излучения лазера с кольцевым резонатором. Видно, что излучение имеет многомодовую периодическую структуру, причем расстояние между модами составляет приблизительно 17 Å, что хорошо согласуется с известной формулой для межмодового расстояния мод шепчущей галереи, следующей из (2) и применимой в нашем случае:

$$\Delta\lambda_{\text{WGM}} = \frac{\lambda^2}{2\pi R n}, \quad (3)$$

где $R = 150 \mu\text{m}$ — радиус кольцевого резонатора, $n = 3.5$ — коэффициент преломления света в активной области волновода, при подстановке значений этих параметров, в нашем случае получили $\Delta\lambda = 18 \text{ Å}$. Аналогичные измерения были произведены и для лазеров с резонатором других размеров (200 и 100 μm), которые показали, что спектры также имеют многомодовую периодическую структуру. При этом измеренное межмодовое расстояние хорошо согласуется с расчетами по формуле (3) (для лазеров с кольцевым резонатором с внешним диаметром 200 μm было получено — $\Delta\lambda_{\text{cal}} = 26.6 \text{ Å}$, $\Delta\lambda_{\text{exp}} = 27 \text{ Å}$, а для диаметра 100 μm — $\Delta\lambda_{\text{cal}} = 53.2 \text{ Å}$, $\Delta\lambda_{\text{exp}} = 55 \text{ Å}$). На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что созданные лазеры с кольцевым резонатором работают на модах шепчущей галереи.

Результаты исследования порогового тока WGM-лазеров с резонатором в форме диска или кольца диаметром 100, 200 и 300 μm сведены в таблицу.

Чтобы выявить различия в величине порогового тока WGM-лазеров в форме диска и кольца, мы провели статистическую обработку результатов измерения для лазеров с диаметром 200 μm (в этом случае имеется достаточное количество измеренных лазеров) и обнаружили, что среднестатистическое значение порогового тока для дискового лазера составляет 271 mA, а для кольцевого лазера — 301 mA. Авторы ожидали, что уменьшение площади лазерного чипа кольцевого

Диаметр резонатора	Кольцевой резонатор		Дисковый резонатор	
	N лазера	I_{th}, mA	N лазера	I_{th}, mA
100	1	370	5	610
100	2	560	6	420
100	3	415	8	540
100			7	470
200	1	370	1	300
200	2	250	2	220
200	3	370	3	300
200	4	290	4	250
200	5	220	5	210
200	6	340	6	250
200	7	270	7	340
200			8	230
200			10	340
300	1	370	1	850
300	2	305	2	370
300	3	310	5	440
300	4	310		
300	5	330		
300	6	280		
300	7	390		

лазера по сравнению с дисковым лазером того же диаметра приведет к уменьшению порогового тока кольцевого лазера пропорционально уменьшению площади. Однако реально мы наблюдали незначительное увеличение порогового тока у кольцевых лазеров. Такое поведение кольцевых лазеров обусловлено двумя факторами. Во-первых, неравномерным распределением плотности тока по диаметру дискового лазера. В направлении от центра диска к его периметру плотность тока может возрастать в несколько раз, а максимум плотности тока находится у краев диска [3,6]. Это приводит к тому, что удаление центральной части диска сказывается на уменьшении полного тока через структуру значительно слабее, чем это было бы в случае однородного его протекания. В реальном WGM-лазере основным механизмом оптических потерь, обуславливающих пороговый ток, является

рассеяние света на неоднородностях краев резонатора. В кольцевом резонаторе это рассеяние возможно также и на внутренней стороне кольца, что приводит к увеличению порога, которое компенсирует выигрыш, обусловленный уменьшением доли тока, не участвующего в формировании лазерного излучения, из-за удаления центральной части резонатора. В то же время поскольку спонтанное излучение в существенной степени формируется в центральной части диска, то переход от дискового лазера к кольцевому лазеру может существенно снизить его спонтанную составляющую. Что мы и наблюдаем в эксперименте. Во-вторых, в кольцевых лазерах по сравнению с дисковыми лазерами сформирована еще одна внутренняя боковая поверхность, которая может приводить к дополнительным поверхностным утечкам, что может приводить к дополнительному увеличению порогового тока кольцевых лазеров.

Таким образом, созданы и исследованы полупроводниковые WGM-лазеры среднего ИК-диапазона с кольцевым резонатором (с внешним диаметром резонатора 300, 200 и 100 μm), работающие при комнатной температуре в импульсном режиме. Проведены сравнительные исследования дисковых и кольцевых WGM-лазеров и показано, что:

- кольцевые лазеры, как и дисковые, работают на модах шепчущей галереи;
- спонтанное излучение в кольцевых лазерах почти на порядок меньше, чем в дисковых лазерах, за счет исключения из рекомбинации центральной части дискового лазера;
- пороговая плотность тока кольцевых лазеров незначительно превышает значение порогового тока дисковых лазеров за счет как возрастания плотности тока к краям дискового и кольцевого лазеров, так и появления поверхностных токов утечки на внутренней поверхности кольцевого лазера.

Авторы благодарят Е.В. Кузнецову и Н.В. Власенко за помощь в работе.

Работа частично поддержана грантами РФФИ 07-02-92170-НЦНИ_a и 08-02-90039-Бел_a и программой президиума РАН № 27 „Основы фундаментальных исследований нанотехнологий и наноматериалов“.

Список литературы

- [1] *Sherstnev V.V., Krier A., Monakhov A.M., Hill G.* // *Electron. Lett.* 2003. V. 39. P. 916–918.
- [2] *Anders S., Tamosiunas V., Schrenk W., Strasser G.* // *Phys. Rev. B.* 2004. V. 69. P. 073309.
- [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. С. 1087–1092.
- [4] *Lee P., Lu T., Tsai F., Lu T.* // *Appl. Phys. Lett.* 2006. V. 89. P. 231111.
- [5] *Norris G., Krier A., Sherstnev V.V., Monakhov A.M., Baranov A.N.* // *Appl. Phys. Lett.* 2007. V. 90. P. 011105.
- [6] *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 Physics.* 2007. V. 33. N 2–3. P. 283.
- [7] *Xia J.S., Nemoto K., Ikegami Y., Shiraki Y., Usami N.* // *Appl. Phys. Lett.* 2007. V. 91. P. 011104.
- [8] *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. P. 537–539.
- [9] *Шерстнев В.В., Гребеницкова Е.А., Монахов А.М., Астахова А.П., Ильинская Н.Д., Яковлев Ю.П., Boissier G., Teissier R., Баранов А.Н.* // *Письма в ЖТФ.* 2008. Т. 34. В. 21. С. 27–32.