

06;07

Интерференция излучения дисковых лазеров на основе квантово-размерных наногетероструктур AlGaAsSb/InGaAsSb

© А.Н. Именков, В.В. Шерстнев, А.М. Монахов,
Е.А. Гребенщикова, А.С. Головин, М.А. Сиповская,
Д.А. Старостенко, М.И. Ларченков, С.И. Трошков,
Д.И. Тарасов, А.Н. Баранов, Ю.П. Яковлев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург,
Россия
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 10 марта 2010 г.

Исследована диаграмма направленности дисковых WGM-лазеров на основе квантово-размерных наногетероструктур AlGaAsSb/InGaAsSb. Резонаторы дисковых лазеров изготавливались методом жидкостного химического травления и представляли собой усеченный конус высотой $15\ \mu\text{m}$, верхняя часть которого (около $5\ \mu\text{m}$) имеет форму цилиндра с выступающим дисковым кольцом над поверхностью цилиндра (на $\sim 1.0\ \mu\text{m}$), и с шириной, равной толщине активной области. В диаграмме направленности WGM-лазеров наблюдается кольцевая интерференционная картина с несколькими максимумами, отстоящими друг от друга на $\sim 6^\circ$. Наблюдаемую как в спонтанном, так и в лазерном режимах генерации интерференционную картину можно объяснить интерференцией лучей света, непосредственно исходящих из кольца с лучами, отраженными от травленной поверхности кристалла.

В последние годы интенсивно развиваются исследования по созданию WGM-лазеров, генерирующих излучение в средней ИК-области спектра ($2\text{--}4\ \mu\text{m}$) на основе мод шепчущей галереи (whispering gallery mode, сокращенно — WGM) [1–4]. Такие лазеры привлекательны большой добротностью резонатора и низким значением порогового тока по сравнению с полосковыми лазерами.

Одной из главных проблем, препятствующих активному использованию дисковых WGM-лазеров, является затрудненный вывод из-

лучения за пределы дискового резонатора. Создание резонатора в форме усеченного диска [5] показало возможность выводить излучение через скол, перпендикулярный плоскости активной области. Излучение полудисковых лазеров исследовано в работах [6–8]. Обнаружены частотная перестройка [6,7] и интерференция выходящего излучения [8]. Другой метод вывода лазерного излучения связан с тем, что резонатор, изготовленный методом химического травления, имеет форму усеченного конуса, с дискообразным кольцом, удерживающим WGM-моду [9–10]. В таком резонаторе моды шепчущей галереи эффективно локализируются в дискообразном выступе WGM-лазера. Данная работа является продолжением работы [8] и посвящена исследованию диаграммы направленности излучения WGM-лазера с дисковым резонатором.

Цель настоящей работы — исследование диаграммы направленности излучения, выходящего из кольцеобразного выступа на цилиндрическом резонаторе WGM-лазера.

Для решения поставленной задачи были выращены структуры для лазеров, излучающих на длине волны вблизи $2.4\ \mu\text{m}$, методом молекулярно-пучковой эпитаксии на установке RIBER Compact 21E на подложке GaSb (100) *n*-типа. Составы слоев и их толщины были такими же, как в работах [6–8]. Активная область общей толщиной $850\ \text{nm}$ состояла из двух напряженных квантовых ям состава $\text{Ga}_{0.65}\text{In}_{0.35}\text{As}_{0.11}\text{Sb}_{0.89}$, каждая по $10\ \text{nm}$, разьединенных слоем $30\ \text{nm}$ состава $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}_{0.02}\text{Sb}_{0.98}$. Волноводные слои, изготовленные из $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}_{0.02}\text{Sb}_{0.98}$, имели толщину по $400\ \text{nm}$. Активная область преднамеренно не легировалась. Волновод был ограничен широкозонными слоями *p*(Be)- и *n*(Te)- $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}_{0.08}\text{Sb}_{0.92}$ толщинами по $\sim 1.0\ \mu\text{m}$. С внешней стороны широкозонных слоев были выращены два тонких, по $100\ \text{nm}$ варизонных слоя AlGaAsSb для улучшения инжекции носителей заряда в активную область. Верхний контактный слой GaSb *p*-типа имел толщину $475\ \text{nm}$ и был легирован до концентрации дырок $5 \cdot 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$. Более подробно процесс выращивания лазерной структуры описан в [11].

Из созданных структур, толщина подложки которых составляла $200\ \mu\text{m}$, изготавливались лазерные чипы. Дисковые резонаторы (рис. 1, *a*), изготовленные методом фотолитографии и жидкостного химического травления, представляли собой конус высотой $15\ \mu\text{m}$, верхняя часть которого (около $5\ \mu\text{m}$) имела форму цилиндра диаметром $200\ \mu\text{m}$. При подборе травителя принималась во внимание зависимость

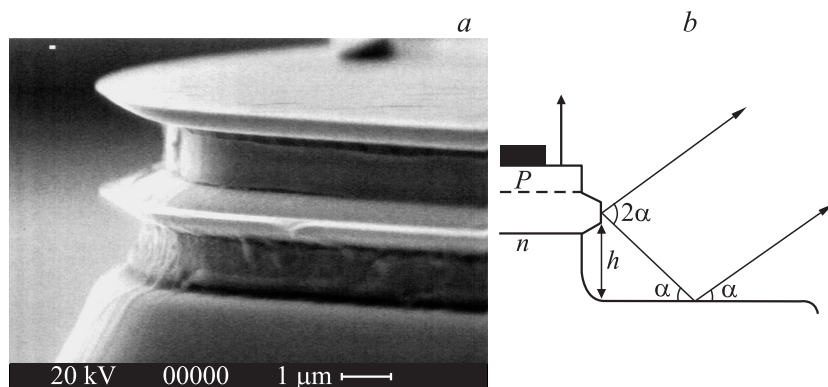


Рис. 1. Микрофотография резонатора в форме пагоды WGM-лазера (а). Схема выхода лучей из WGM-лазера (b).

скорости травления от состава лазерной структуры. В частности, слой, содержащие Al, травятся в травителе на основе CrO_3 с большей скоростью, чем другие слои [9]. В результате травления был создан дисковый резонатор, по форме напоминающий китайскую пагоду. Из рис. 1, а видно, что резонатор представляет собой цилиндр с выступающим дисковым кольцом, содержащим слой активной области. Кольцо выступает над поверхностью цилиндра на $\sim 1.0 \mu\text{m}$, а его ширина равна толщине активной области. Электромагнитная волна частично проникает в выступающую часть резонатора и может из нее излучаться.

Омические контакты к полупроводниковой гетероструктуре создавались методом термического вакуумного напыления с взрывной фотолитографией. Для этого на эпитаксиальный слой $p\text{-GaSb}$ наносили последовательно подслои Cr, слои Au:Zn и Au. Верхний контакт лазерного чипа представлял собой кольцо шириной $10\text{--}30 \mu\text{m}$, которое отстояло от края резонатора на $5\text{--}10 \mu\text{m}$. Со стороны подложки напыляли слои Cr–Au:Te–Au. После напыления структура подвергалась термообработке в среде водорода для создания омического контакта. Затем структуру раскалывали на чипы площадью $500 \times 500 \mu\text{m}^2$ с резонатором в центре. Чипы спаивались на корпус TO-18 с плоским столиком. Таким образом, были изготовлены дисковые WGM-лазеры.

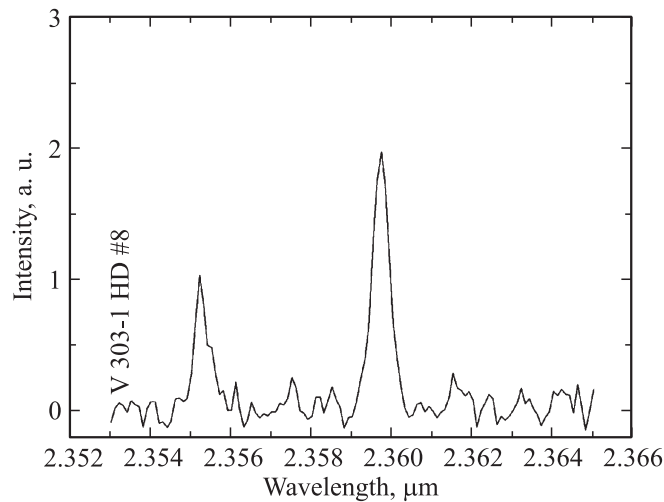


Рис. 2. Спектр излучения WGM-лазера (спектральное разрешение 2 \AA), измеренный при токе накачки 400 mA , длительности импульсов $0.5 \mu\text{s}$ и частоте повторения 30 kHz при комнатной температуре.

Исследования WGM-лазеров показали, что все они имели диодные характеристики с напряжением отсечки $\sim 0.6 \text{ V}$ при комнатной температуре и дифференциальным сопротивлением $0.8\text{--}1.0 \Omega$. Для изучения модовой структуры спектров WGM-лазеров использовался двухрешеточный спектрометр марки ДФС-32 с неохлаждаемым фоторезистором PbS в качестве фотодетектора. Оптическое разрешение спектрометра составляло 2 \AA . Через лазеры пропускался импульсный ток величиной от 0.1 до 0.7 A . Длительность импульсов менялась от 0.1 до $1.5 \mu\text{s}$ при постоянной скважности, равной 33. Измерения проводились при комнатной температуре. Пороговый ток составлял $170\text{--}240 \text{ mA}$. В режиме генерации наблюдались лазерные моды шепчущей галереи. На рис. 2 приведен типовой спектр WGM-лазера.

Для изучения интерференции выходящего излучения измерялось распределение интенсивности излучения в дальней зоне (диаграмма направленности) дисковых лазеров. Для этого лазер вращался вокруг оси, лежащей в плоскости $p-n$ -перехода. Фотоприемник располагался в плоскости, проходящей через лазер перпендикулярно оси вращения.

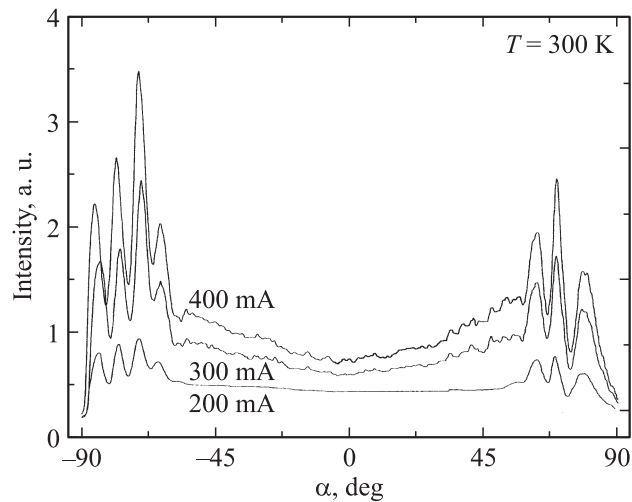


Рис. 3. Распределение интенсивности излучения дискового лазера в дальней зоне, в плоскости резонатора при различных токах.

Излучение регистрировалось фотосопротивлением из PbS с шириной фоточувствительной полосы 0.87 mm на расстоянии 10 cm от лазера, что обеспечивало угловое разрешение 0.5° . Питание лазера и регистрация его излучения осуществлялись так же, как при спектральных измерениях.

Из диаграммы направленности (рис. 3) видно сильное боковое излучение с несколькими максимумами, отстоящими друг от друга в среднем на $\sim 6^\circ$. Эти максимумы присутствуют как в спонтанном, так и в лазерном режимах генерации и создают кольцевую интерференционную картину. В центральной области диаграммы тонкая структура отсутствует в спонтанном режиме. В лазерном режиме она наблюдается с разрешаемыми интервалами между максимумами от 1 до 4° .

Наблюдаемую как в спонтанном, так и в лазерном режимах генерации интерференционную картину можно объяснить интерференцией лучей, непосредственно исходящих из кольца с активной областью гетероструктуры, с лучами, отраженными от травленной плоскости кристалла (рис. 1, b). Угловое расстояние между максимумами в этом

случае должно выражаться формулой

$$\Delta\alpha = \frac{\lambda}{2h \cos \alpha}, \quad (1)$$

где α — угол между направлением луча и плоскостью кристалла, λ — длина волны в воздухе, h — расстояние от активной области до травленной плоскости кристалла. При $\alpha \ll 1$, $\lambda = 2.4 \mu\text{m}$ и $h = 12 \mu\text{m}$ вычисляем по формуле (1) $\Delta\alpha \cong 6^\circ$, что близко к экспериментально измеренной величине. Интенсивность излучения, выходящего из кольца, в 5–10 раз больше, чем с поверхности цилиндрического резонатора, дающего сигнал в середине диаграммы направленности ($\alpha < 45^\circ$).

Таким образом, выступающее кольцо с активной областью является излучателем в дисковых WGM-лазерах. Это можно объяснить тем, что выступающее кольцо над поверхностью цилиндра, содержащее слой активной области, локализует часть лазерного излучения. Постоянная распространения мод шепчущей галереи, приобретая свою величину в основном в толще цилиндра, создает большую амплитуду электромагнитной волны на поверхности кольца.

Таким образом, в диаграмме направленности излучения дисковых WGM-лазеров с выступающей боковой поверхностью наблюдается кольцевая интерференционная картина с несколькими максимумами, отстоявшими друг от друга на $\sim 6^\circ$. Наблюдаемую как в спонтанном, так и в лазерном режимах генерации интерференционную картину можно объяснить интерференцией лучей света, непосредственно исходящих из выступающего кольца, с лучами, отраженными от травленной поверхности кристалла.

Работа частично поддержана программой президиума РАН № 27 „Основы фундаментальных исследований нанотехнологий и наноматериалов“, грантами РФФИ 10-02-93110-НЦНИЛ_а, 10-02-00548-а и 09-08-91224-СТ_а, а также государственным контрактом № 02.740.11.0445.

Список литературы

- [1] *Sherstnev V.V., Krier A., Monakhov A.M., Hill G.* // Electronics Letters (USA). 2003. V. 39(12). P. 916–917.
- [2] *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.

- [3] *Averkiev N.S., Sherstnev V.V., Monakhov A., Krier A., Wright D.A., Kislyakova A.Yu., Grebenshikova E.A. Yakovlev Yu.P. // Low Temperature Physics. 2007. V. 33. N 2–3. 2006. P. 283–290.*
- [4] *Аверкиев Н.С., Монахов А.М., Шерстнев В.В., Яковлев Ю.П., Гребеницкова Е.А., Ильинская Н.Д., Калинина К.В., Кижжаев С.С., Кислякова А.Ю., Монахов А.М., Шерстнев В.В., Яковлев Ю.П. // ФТП. 2009. Т. 43. В. 1. С. 124–127.*
- [5] *Monakhov A.M., Sherstnev V.V., Astakhova A.P., Yakovlev Yu.P., Boissier G., Teissier R., Varanov A.N. // Appl. Phys. Lett. 2009. V. 94. P. 051102.*
- [6] *Именков А.Н., Шерстнев В.В., Сиповская М.А., Астахова А.П., Гребеницкова Е.А., Монахов А.М., Boissier G., Teissier R., Varanov A.N., Яковлев Ю.П. // Письма в ЖТФ. 2009. В. 18. С. 50–57.*
- [7] *Именков А.Н., Шерстнев В.В., Сиповская М.А., Гребеницкова Е.А., Баскаков П.Н., Boissier G., Teissier R., Varanov A.N., Яковлев Ю.П. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. В. 24. С. 52–58.*
- [8] *Именков А.Н., Шерстнев В.В., Дершевич А.И., Boissier G., Teissier R., Varanov A.N., Яковлев Ю.П. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. В. 24. С. 12–19.*
- [9] *Гребеницкова Е.А., Ильинская Н.Д., Шерстнев В.В., Монахов А.М., Астахова А.П., Яковлев Ю.П. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 21. С. 27–32.*
- [10] *Алексеев Я.В., Монахов А.М., Рожанский И.В. // ЖТФ. 2009. В. 11. С. 72–76.*
- [11] *Yarekha D.A., Glastre G., Perona A., Rouillard Y., Genty F., Skouri E.M., Bossier G., Grech P., Joullie A., Alibert C., Varanov A.N. // Electron. Lett. 2000. V. 36. N 6. P. 537–539.*