

06;12

Дисковые WGM-лазеры ($\lambda = 2.4 \mu\text{m}$) с выпуклым резонатором, работающие при комнатной температуре

© Е.А. Гребенщикова, Н.Д. Ильинская, В.В. Шерстнев,
А.М. Монахов, А.П. Астахова, 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: eagr@iropt7.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 15 февраля 2008 г.

Впервые создан инфракрасный полупроводниковый WGM-лазер с длиной волны излучения $2.4 \mu\text{m}$ с выпуклым резонатором, работающим при комнатной температуре. Для получения выпуклого резонатора был разработан специальный травитель $\text{CrO}_3/\text{HF}/\text{H}_2\text{O}$. Изучены спектры излучения при комнатной температуре. Созданный лазер генерирует WGM-моды при комнатной температуре в импульсном режиме.

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

Полупроводниковые лазеры, работающие в средней инфракрасной (ИК) области спектра ($2-5 \mu\text{m}$), представляют большой интерес для практического применения. Они служат основой для систем беспроводной телекоммуникации, используются при проведении абсорбционного высокоточного экспресс-анализа состава различных газовых сред. Кроме того, такие лазеры могут применяться во многих областях медицины, биологии, экологии, а также для контроля различных технологических процессов [1]. Особенно актуальна разработка лазеров, работающих при комнатной температуре, пригодных для массового производства. Одним из перспективных источников когерентного излучения для среднего ИК диапазона является новый тип лазеров, получивший название WGM-лазеры [2-6]. Эти лазеры имеют резонатор в виде диска и отличаются более высокой добротностью и менее жесткими требованиями к технологии изготовления. Рабочая мода таких лазеров

получила название „мода шепчущей галереи“ или whispering gallery mode, сокращенно — WGM.

Полупроводниковые лазеры, как и все лазеры, имеют два основных компонента: активную среду, в которой свет генерируется благодаря внешнему источнику энергии, например, электрическому току, и лазерный резонатор, который содержит активный материал и обеспечивает обратную связь для вынужденного излучения света. Одним из способов добиться генерации лазеров, у которых активная область обладает недостаточно большим коэффициентом оптического усиления, является повышение добротности резонатора. Это особенно актуально для лазеров диапазона $2\text{--}5\ \mu\text{m}$, где оптическое усиление стандартной активной среды на основе гетероперехода II рода невелико. Как известно [7], добротность дисковых резонаторов может достичь величины 10^6 , что позволяет считать, что такие резонаторы могут найти применение для создания полупроводниковых лазеров среднего ИК диапазона.

Одним из существенных недостатков созданных ранее WGM-лазеров является то, что дисковый резонатор в окрестности активной области имеет форму, близкую к конусообразной, что приводит к вытеканию мод в направлении подложки, существенно уменьшает добротность такого резонатора и, как результат, увеличивает пороговый ток данного лазера. Так, например, в [2–6] сообщалось о WGM-лазерах, однако их эффективность была далеко не достаточна для практического применения.

Цель настоящей работы — создание дискового резонатора выпуклой формы, в котором часть активной области выступает по всему периметру диска за пределы эмиттерных слоев (рис. 1, *a*). В таком резонаторе создаются условия для формирования устойчивых WGM-мод в выступающей части активной среды. Стабилизация моды в вертикальном направлении позволяет создавать лазерные структуры без внутренних слоев, обеспечивающих оптическое ограничение.

Для решения поставленной задачи была выращена структура методом молекулярно-пучковой эпитаксии на установке RIBER Compact 21E на подложке GaSb (100) *n*-типа. Активная область толщиной 856 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 13 nm, разьединенных слоем $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}_{0.02}\text{Sb}_{0.98}$ толщиной 30 nm. Волновые 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)- $\text{Al}_{0.09}\text{Ga}_{0.1}\text{As}_{0.08}\text{Sb}_{0.92}$ толщиной $1.0\ \mu\text{m}$.

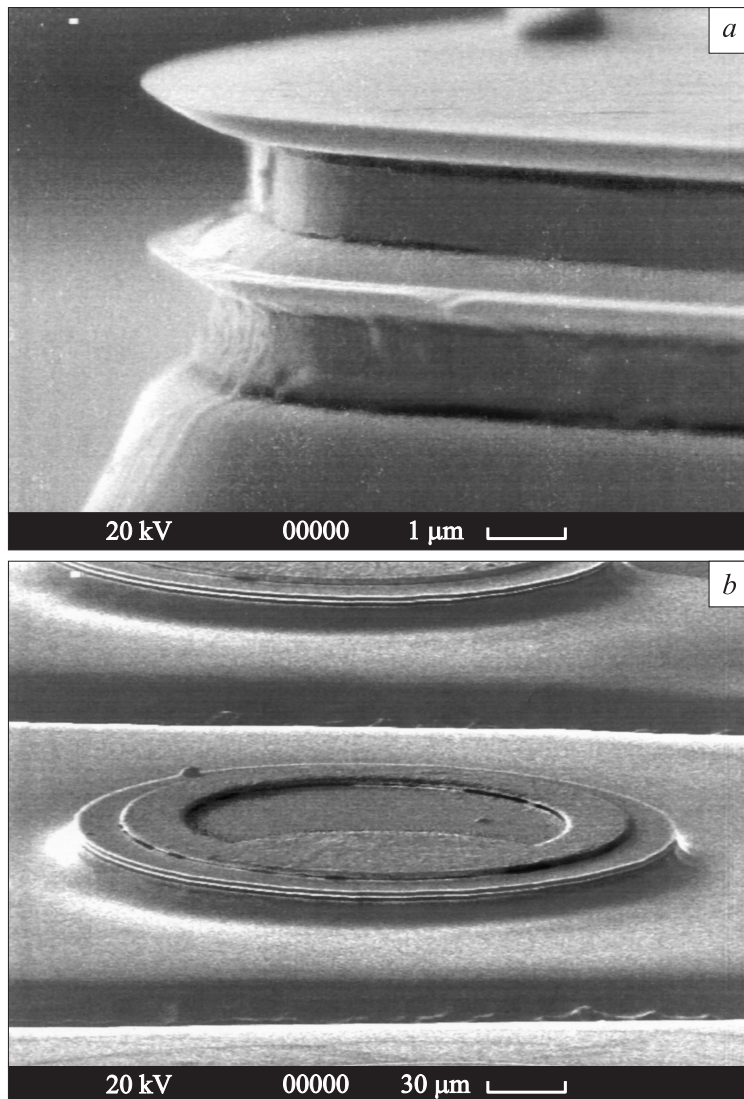


Рис. 1. Микрофотографии дискового WGM-лазера диаметром $200 \mu\text{m}$ после травления: *a* — вид профиля резонатора, *b* — общий вид.

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 [8]. Лазерные чипы изготавливались методом фотолитографии.

Как отмечалось выше, для создания WGM-лазера была использована структура, в которой чередуются напряженные и ненапряженные слои. Травление таких слоев происходит по-разному, а именно: изоперодные слои, содержащие алюминий травятся с большей скоростью, чем напряженный слой $\text{Ga}_{0.65}\text{In}_{0.35}\text{As}_{0.11}\text{Sb}_{0.89}$. Исходя из этого, был разработан травитель $\text{CrO}_3/\text{HF}/\text{H}_2\text{O}$, травление в котором в течение 1 минуты при комнатной температуре позволило получить резонатор цилиндрической формы диаметром 200 μm и высотой 15 μm (рис. 1, *b*), при этом профиль резонатора напоминал форму гриба (рис. 1, *a*).

Для формирования омических контактов методом термического вакуумного напыления наносили $\text{Cr}-\text{Au}-\text{Ni}-\text{Au}$ на эпитаксиальный слой. Нижний слой хрома служил для улучшения адгезии последующих слоев. В целях увеличения толщины контактного слоя до $\sim 2 \mu\text{m}$, свехру электрохимическим методом осаждалось золото. Верхний контакт представлял собой кольцо диаметром 180 μm , шириной 30 μm , отстоящее от края диска на 10 μm . Со стороны подложки методом термического вакуумного напыления наносился сплошной многослойный $\text{Cr}-\text{Au}-\text{Ni}-\text{Au}$ контакт. После напыления и осаждения структура подвергалась термообработке в среде водорода для сплавления металлических слоев. Микрофотография изготовленного таким образом лазерного диода приведена на рис. 1, *b*. Кристалл припаивался на корпус ТО-18 с помощью индия. Излучение собиралось параболическим отражателем. Была собрана и измерена серия лазеров, все они имели нормальные диодные характеристики.

Спектры электролюминесценции лазерных диодов изучались в импульсном режиме. Длительность импульса менялась от 50 ns до 2 μs , частота следования от 1 до 32 kHz. Через диоды пропускался ток величиной от 0.1 до 5 А. Измерения проводились при комнатной температуре.

Для изучения модовой структуры спектров использовался монохроматор DK-480 (CVI Laser Corp.). Излучение регистрировалось охла-

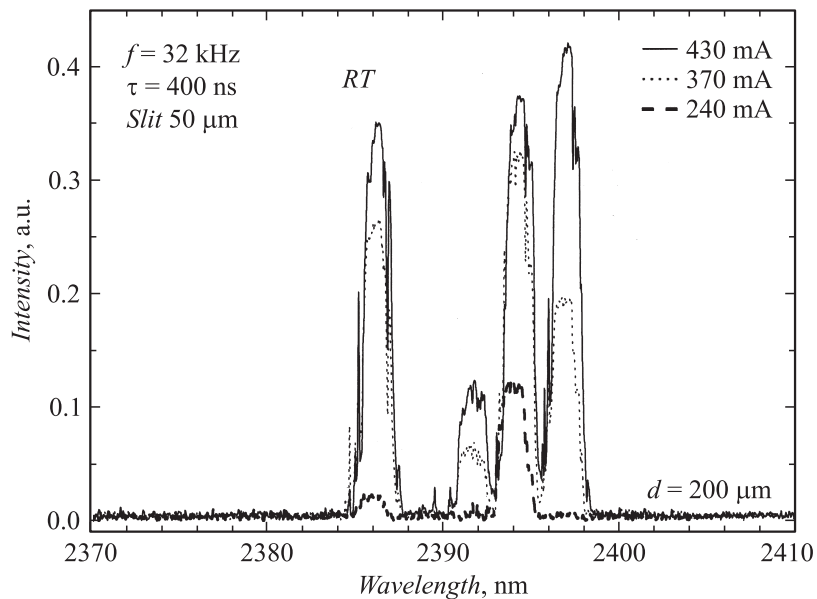


Рис. 2. Спектры излучения лазера, изображенного на рис. 1 при различных токах накачки.

ждаемым InSb-фотодиодом модели J10D. В качестве предварительного усилителя использовался прибор PA-9 фирмы Judson Technologies. Измерения проводились по схеме синхронного детектирования с использованием прибора Stanford Research типа SR810.

На рис. 2 показан типичный спектр когерентного излучения лазера с диаметром резонатора $200 \mu\text{m}$ при разных токах. Видно, что излучение имеет многомодовую периодическую структуру, причем расстояние между модами составляет приблизительно 27 \AA , что хорошо согласуется с известной формулой для межмодового расстояния мод шепчущей галереи [3]:

$$d\lambda = \lambda^2 / 2 * \pi * R * n, \quad (1)$$

где $R = 100 \mu\text{m}$ — радиус дискового резонатора, $n = 3, 5$ — коэффициент преломления света в активной области волновода. При подстановке значений этих параметров в нашем случае получили $d\lambda = 26 \text{ \AA}$.

Таким образом, впервые создан ИК полупроводниковый WGM-лазер с длиной волны $2.4\ \mu\text{m}$ с выпуклым резонатором, работающий при комнатной температуре. Разработан специальный травитель на основе $\text{Cr}_3/\text{HF}/\text{H}_2\text{O}$, который позволяет создавать дисковые резонаторы выпуклой формы.

Межмодовое расстояние генерируемого излучения хорошо согласуется с известной формулой для межмодового расстояния мод шепчущей галереи. Авторы считают, что придание дисковому резонатору WGM-лазера выпуклой формы создает условия для формирования устойчивых WGM-мод в выступающей части активной среды и повышает добротность дискового резонатора.

Работа частично поддержана грантами РФФИ 07-02-13616-офи_ц и 07-02-92170-НЦНИ_а.

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 Spectroscopy V. 66, Issues 4–5, April 2007. P. 824–831.
- [2] *Sherstnev V.V., Monakhov A.M., Krier A., Hill G.* // Appl. Phys. Lett. 2000. V. 77. P. 3908.
- [3] *Sherstnev V.V., Krier A., Monakhov A.M.* // Electron. Lett. 2003. V. 39. P. 916–918.
- [4] *Шерстнев В.В., Монахов А.М., Астахова А.П., Кислякова А.Ю., Яковлев Ю.П., Аверкиев Н.С., Krier A., Hill G.* // Физика и техника полупроводников. 2005. Т. 39. В. 9. С. 1087–1092.
- [5] *Sherstnev V.V., Monakhov A.M., Krier A., Wright D.A.* // IEE Proc. Optoelectronic. 2005. V. 152. № 1. P. 1–5.
- [6] *Шерстнев В.В., Монахов А.М., Кислякова А.Ю., Яковлев Ю.П., Аверкиев Н.С.* // Известия РАН. Серия физическая. 2006. Т. 70. № 3. С. 364–367.
- [7] *Cohen D.A., Hossein-Zadeh M., Levi A.F.J.* // Sol. St. Electron. 2001. V. 45. P. 1577–1582.
- [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. N 6. P. 537–539.