

06.2:07

## Частотно-перестраиваемый полупроводниковый WGM-лазер ( $\lambda = 2.35 \mu\text{m}$ ), работающий при комнатной температуре

© А.Н. Именков, В.В. Шерстнев, М.А. Сиповская, А.П. Астахова,  
Е.А. Гребенщикова, А.М. Монахов, К.В. Калинина, 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 17 апреля 2009 г.

Исследована частотная перестройка WGM-лазера ( $2.35 \mu\text{m}$ ) с секторным резонатором. Обнаружено, что в процессе протекания импульса тока длительностью до  $1.2 \mu\text{s}$  наблюдается плавная перестройка длины волны излучения основной моды в длинноволновую сторону на  $30 \text{ \AA}$  при комнатной температуре, что больше межмодового расстояния в 1.4 раза.

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

В диапазоне  $1.8\text{--}2.4 \mu\text{m}$  лежат обертоны и комбинированные переходы в молекулах ряда веществ ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$  и др.) [1]. Поэтому создание диодных лазерных спектрометров высокого разрешения для этой спектральной области является перспективной задачей [1].

В спектральном диапазоне  $1.8\text{--}2.4 \mu\text{m}$  прежде создавались перестраиваемые по частоте диодные лазеры полосковой конструкции [2]. В таких лазерах с резонатором Фабри–Перо диапазон перестройки отдельной моды меньше межмодового интервала и составляет  $4\text{--}16 \text{ \AA}$ .

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) [3–6]. Такие лазеры привлекательны

большой добротностью резонатора и низкими значениями порогового тока по сравнению с полосковыми лазерами.

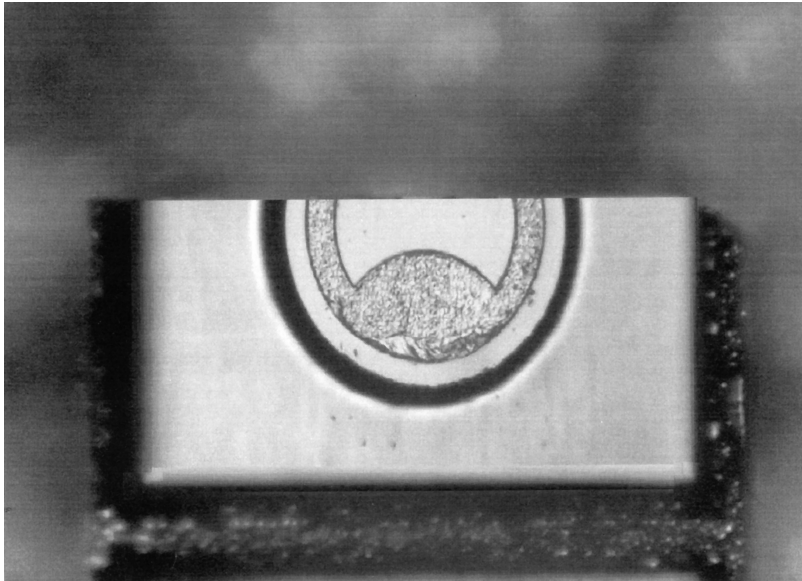
В литературе отсутствуют сведения об исследовании частотной перестройки полупроводниковых WGM-лазеров.

Цель настоящей работы — создание и исследование частотно-перестраиваемого инфракрасного полупроводникового WGM-лазера на длину  $2.35 \mu\text{m}$ , работающего при комнатной температуре.

Для решения поставленной задачи была выращена структура методом молекулярно-пучковой эпитаксии на установке RIBER Compact 21E на подложке GaSb (100) *n*-типа. 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 толщиной  $10 \text{ nm}$ , разведенных 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  $1.0 \mu\text{m}$ . 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 [7].

Из созданных структур изготавливались лазерные чипы с резонатором в форме диска диаметром  $200 \mu\text{m}$  и высотой  $15 \mu\text{m}$  методом фотолитографии и химического травления.

Омические контакты к полупроводнику создавались методом термического вакуумного напыления с взрывной фотолитографией. Для этого на эпитаксиальный слой наносили последовательно металлы и сплав Cr–Au:Zn–Au. Контакт лазерного чипа представлял собой кольцо шириной  $30 \mu\text{m}$  с внешним диаметром  $180 \mu\text{m}$  и отстоял от края резонатора на  $10 \mu\text{m}$  (рис. 1). Со стороны подложки также методом термического вакуумного напыления наносился сплошной многослойный Cr–Au:Te–Au контакт. После напыления структура подвергалась термообработке в среде водорода для сплавления металлических слоев. Из полученных чипов методом раскалывания изготавливались симметричные лазерные кристаллы с резонаторами в форме полудиска. Кристалл припаивался на корпус ТО-18 индием. Излучение собиралось параболическим отражателем.

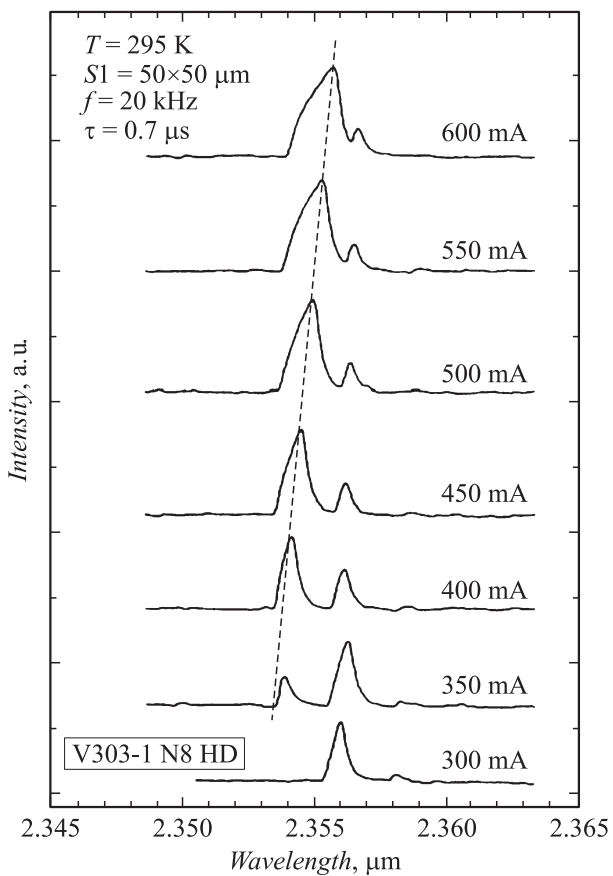


**Рис. 1.** Микрофотография чипа WGM-лазера с резонатором в форме полудиска (вид сверху).

Была собрана и измерена серия лазеров с резонатором в форме полудиска. Все они имели диодные характеристики с напряжением отсечки  $\sim 0.6$  V при комнатной температуре и дифференциальным сопротивлением  $0.8\text{--}1.0$   $\Omega$ .

Для излучения модовой структуры спектров лазеров использовался спектрометр марки ДФС-32 с неохлаждаемым фоторезистором PbS в качестве фотодетектора. Спектры снимались с разрешением  $2$   $\text{\AA}$ .

Спектры излучения WGM-лазерных диодов исследовались при комнатной температуре (295 K) и различных импульсных токах амплитудой от 200 до 600 mA. На лазеры подавались импульсы длительностью от 0.1 до 1.2  $\mu\text{s}$ , следовавшие с частотой 20 kHz. Питание прерывалось с частотой 421 Hz и заполнением 0.5. Световой сигнал на выходе спектрометра синхронно детектировался на частоте прерывания. Продетектированный спектральный сигнал оказывался пропорциональным средней интенсивности излучения на данной длине волны.



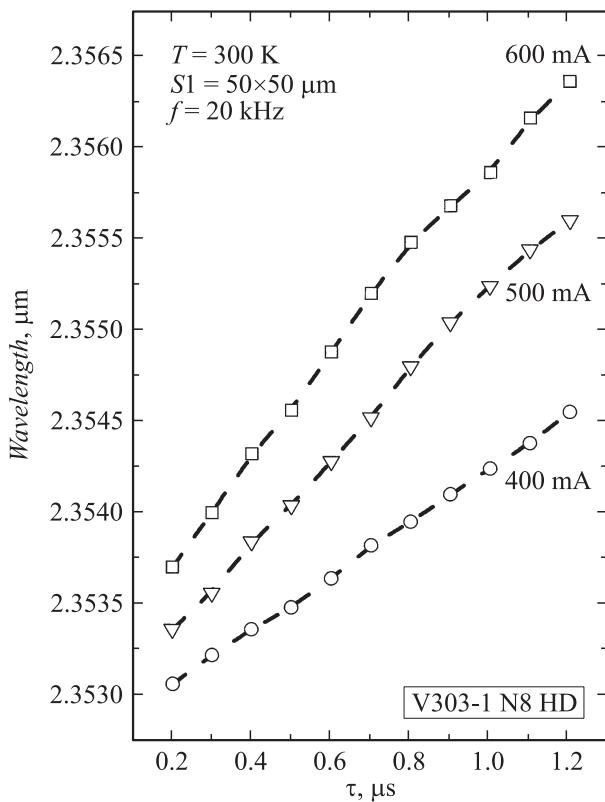
**Рис. 2.** Спектры излучения частотно-перестраиваемого лазера (спектральное разрешение  $2 \text{ \AA}$ ) с резонатором в виде половины диска, измеренные при различной величине тока накачки, длительности импульсов  $0.7 \mu\text{s}$  и частоте повторения  $20 \text{ kHz}$  при комнатной температуре.

На рис. 2 показаны спектры когерентного излучения лазера с резонатором в виде полудиска в интервале токов  $300\text{--}600 \text{ mA}$ . Длительность импульса тока, измеренная на экране осциллографа, составляет  $0.7 \mu\text{s}$ . Видно, что излучение имеет многомодовую периодическую

структуру. Поскольку активная область лазера нагревается в течение импульса тока и моды смещаются в длинноволновую сторону, то приведем начальные длины волн каждой моды, отсчитанные на коротковолновой границе ее спектра. При токе 300 мА, как и на пороге генерации ( $I_{th} = 240$  мА), преобладает мода с длиной волны  $\lambda = 2.3555 \mu\text{m}$ . Имеется и более длинноволновая мода с  $\lambda = 2.3578 \mu\text{m}$ . Но при токе 350 мА появляется еще более коротковолновая мода  $\lambda = 2.3534 \mu\text{m}$ , которая при дальнейшем увеличении тока становится преобладающей. Появление более коротковолновых мод с увеличением тока объясняется увеличением уровня возбуждения лазера с ростом тока и несущественностью влияния нагревания лазера средним током. Экспериментально определенное расстояние между упомянутыми модами в среднем составляет  $\sim 22 \text{ \AA}$ . Это согласуется с расчетами по формуле для межмодового расстояния мод шепчущей галереи в полудисковом резонаторе [5]  $d\lambda_{WGM} = \frac{\lambda^2}{2\pi Rn}$ , где  $R = 100 \mu\text{m}$  — радиус резонатора,  $n = 4.0$  — эффективный коэффициент преломления света в волноводе ( $d\lambda_{cal} = 22 \text{ \AA}$ ). На основании удовлетворительного согласия расчетных и экспериментальных данных можно сделать вывод, что лазер с полудисковым резонатором работает на модах шепчущей галереи.

Обращает на себя внимание уширение спектра преобладающих коротковолновых мод в длинноволновую сторону с ростом тока, превышающее на порядок разрешающую способность спектрометра. Это можно объяснить тем, что активная область лазера нагревается в процессе действия импульса тока, давая плавное увеличение коэффициента преломления в волноводе и соответствующее увеличение длины волны собственных мод резонатора. В результате преобладающая мода плавно смещается в длинноволновую сторону в процессе импульса тока, т.е. наблюдается частотная перестройка лазера на основной моде. Слабые длинноволновые моды почти не перестраиваются и не уширяются, так как они генерируются только на переднем фронте импульса протяженностью  $0.2 \mu\text{s}$ , когда ток  $\leq 350$  мА, а на плато импульса они не генерируются. На плато импульса генерируется фактически только одна мода, т.е. лазер является одномодовым.

На рис. 3 показаны зависимости длины волны ( $\lambda$ ) преобладающей коротковолновой моды, измеренной в максимуме спектра, от длительности импульса тока ( $\tau$ ). Это значение  $\lambda$  достигается в конце плато им-



**Рис. 3.** Зависимость максимальной длины волны основной моды лазера от длительности импульса тока при различных токах.

пульса тока. При всех значениях тока  $\lambda$  увеличивается с ростом  $\tau$  почти линейно. Экстраполяция зависимости  $\lambda$  от длительности импульса тока к нулевому значению  $\tau$  показала, что начальные  $\lambda$  в момент включения тока фактически совпадают при разных токах. Увеличение длины волны в процессе импульса тока приводит к уширению спектра основной моды, отмеченному на рис. 2. Крутизна изменения  $\lambda$  с  $\tau$  (рис. 3) тем больше, чем больше ток. При этом она пропорциональна превышению тока над пороговым значением. Вероятно, нагревание резонатора в

основном происходит за счет джоулева тепла, выделяющегося при протекании тока, и за счет поглощения лазерного излучения высокой плотности, сосредоточивающихся вблизи края диска. Ширина области сосредоточения составляет величину  $\sim 2\lambda$ , согласно расчетам [6].

При токе 600 мА и длительности импульса  $1.2 \mu\text{s}$  длина волны изменится на  $30 \text{ \AA}$ , что превышает межмодовое расстояние в  $\sim 1.4$  раза. По оценкам резонатор лазера при этом нагревается на 30 К. Столь большое изменение длины волны объясняется тем, что роль неравновесных носителей заряда в дисковом квантово-размерном лазере незначительна.

Достигнутое изменение длины волны излучения  $30 \text{ \AA}$  позволяет считать WGM-лазер с резонатором в форме полудиска перспективным для создания портативных диодных лазеров спектрометров.

Таким образом, исследована частотная перестройка при комнатной температуре WGM-лазера с полудисковым резонатором ( $2.35 \mu\text{m}$ ) при импульсном питании в интервале токов 200–600 мА в зависимости от длительности импульса ( $0.1\text{--}1.2 \mu\text{s}$ ). Показано, что с увеличением длительности импульса от 0.1 до  $1.2 \mu\text{s}$  наблюдается перестройка длины волны излучения коротковолновой моды в длинноволновую сторону на  $30 \text{ \AA}$ , что больше межмодового расстояния в 1.4 раза.

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

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

## Список литературы

- [1] *Надеждинский А.И.* // ДЛС-10. Десятый общероссийский семинар по диодной лазерной спектроскопии. 2008. <http://www.dls.gpi.ru/rus/sem/10/Nad.pdf>.
- [2] *Астахова А.П., Баранов А.Н., Висе А., Именков А.Н., Колчанова Н.М., Стоянов Н.Д., Черняев А., Яреха Д.А., Яковлев Ю.П.* // ФТП. 2003. Т. 37. В. 9. С. 502–507.
- [3] *Sherstnev V.V., Krier A., Monakhov A.M., Hill G.* // 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.* // ФТП. 2005. Т. 39. В. 9. С. 1087–1092.

- [5] *Monakhov A.M., Sherstnev V.V., Astakhova A.P., Yakovlev Yu.P., Boissier G., Teissier R., Baranov A.N.* // *Appl. Phys. Lett.* 2009. V. 94. P. 051102.
- [6] *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.
- [7] *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. 283–290.