

06

## **Перестройка частоты генерации лазера работающего на модах шепчущей галереи на основе InAsSb/InAsSbP-гетероструктуры, обусловленная нелинейными оптическими эффектами**

© В.В. Шерстнев, А.Н. Именков, А.П. Астахова,  
Е.А. Гребенщикова, С.С. Кижаяев, М.А. Сиповская,  
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 29 ноября 2009 г.*

Создан перестраиваемый инфракрасный полупроводниковый WGM-лазер с дисковым резонатором, работающий на длине волны  $3.5\mu\text{m}$  при температуре 79 К. Изучены спектры излучения. Зарегистрирована плавная перестройка длины волны излучения основной моды в коротковолновую сторону на  $11\text{ \AA}$ , обусловленная нелинейными оптическими эффектами.

Полупроводниковые лазеры, работающие в средней инфракрасной (ИК) области спектра ( $2\text{--}5\mu\text{m}$ ), представляют большой научный и практический интерес. Они служат основой для систем высокоточного экспресс-анализа состава различных газовых сред. Кроме того, такие лазеры могут применяться во многих областях медицины, биологии и экологии [1]. Одним из перспективных направлений создания ИК-лазеров, работающих при комнатной температуре, являются так называемые WGM-лазеры [2–8]. Описанные в этих работах лазеры имеют резонатор в виде диска и отличаются более высокой добротностью  $Q_{sc} \sim 10^{12}$  [8] и менее жесткими требованиями к технологии изготов-

ления. Рабочая мода таких лазеров получила название „мода шепчущей галереи“ („whispering gallery mode“ — WGM).

В квантово-размерных WGM-лазерах ( $\lambda = 2.4 \mu\text{m}$ ) нами обнаружено плавное увеличение длины волны излучения в процессе протекания импульса тока [9]. Эта перестройка частоты генерации, обусловленная нагреванием лазера питающим током, имеет соответствующую тепловую инертность ( $1 \mu\text{s}$ ). С точки зрения улучшения инерционности интересны ДГС (двойная гетероструктура) лазеры, в активной области которых значительно больше носителей заряда, влияющих на коэффициент преломления, чем в квантово-размерных.

Цель настоящей работы — создание и исследование полупроводникового перестраиваемого за счет нелинейных оптических эффектов WGM-лазера на длину волны  $3.5 \mu\text{m}$ .

Для решения поставленной задачи была выращена лазерная структура на основе гетеропереходов InAsSb/InAsSbP методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (МОГФЭ) при атмосферном давлении в реакторе горизонтального типа. В качестве газа-носителя применялся водород.

Лазерная структура состояла из подложки InAs (100) с проводимостью  $n$ -типа ( $n \sim 2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ), на которой последовательно выращивался широкозонный эмиттерный слой  $n$ -InAs<sub>0.65</sub>Sb<sub>0.11</sub>P<sub>0.24</sub> толщиной  $2.3 \mu\text{m}$ , активная область структуры (преднамеренно нелегированный слой  $n$ -InAsSb<sub>0.06</sub> толщиной  $0.7 \mu\text{m}$  с концентрацией носителей заряда  $2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ) и широкозонный эмиттерный слой  $p$ -InAs<sub>0.65</sub>Sb<sub>0.11</sub>P<sub>0.24</sub> толщиной  $2.85 \mu\text{m}$ , легированный Zn. Концентрация носителей заряда в широкозонных слоях  $n$ - и  $p$ -типа составляла  $2 \cdot 10^{17}$  и  $2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  соответственно. Более подробно процесс выращивания лазерной структуры описан в статьях [10,11].

В качестве источника индия применялся триметилиндий (TMIn). Источниками элементов V группы — Sb, As, P — являлись соответственно триметилантимонид (TMSb) и гидридные газы — AsH<sub>3</sub>, PH<sub>3</sub>, разбавленные в водороде до концентрации 20 wt.%. Для получения проводимости  $p$ -типа в эпитаксиальных слоях использовалась легирующая примесь Zn. В качестве источника Zn применялся диэтилцинк DeZn. Во время роста емкости с металлоорганическими соединениями поддерживались при следующих температурах: TMIn 20°C, TMSb (–9)°C, DeZn 3.8°C.

Эмиттерные слои InAsSbP синтезировались при температуре 580°C. Поток H<sub>2</sub> через емкости с TMI<sub>n</sub> и TMSb составлял в данном случае 602 и 27 ml/min соответственно. Отношение мольных долей элементов V и III групп в газовой фазе — V/III = 10.3. В газовой фазе мольная доля As среди элементов V группы составляла 0.026, мольная доля Sb — 0.046. Верхний барьерный слой InAsSbP во время роста легировался Zn. В случае легирования Zn через емкость с DeZn проходил поток H<sub>2</sub> — 33.5 ml/min. Время выращивания для обоих эмиттерных слоев InAsSbP составляло 3 h 20 min.

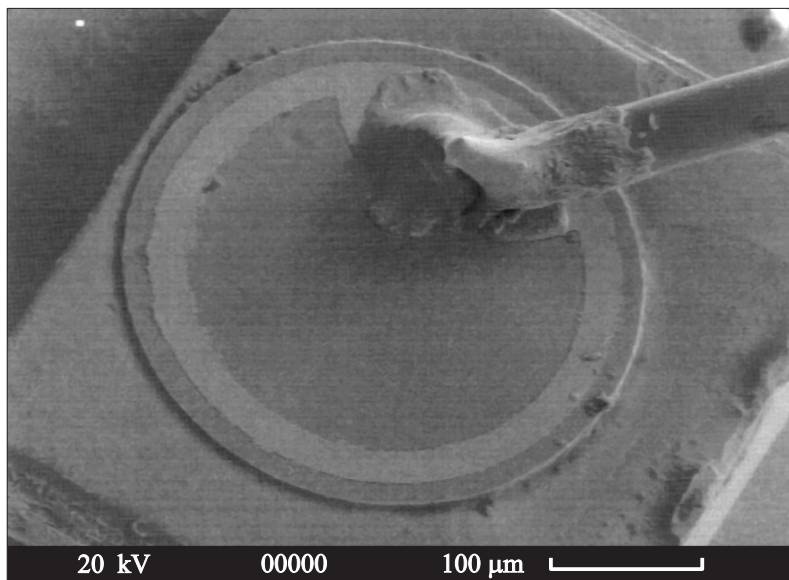
Активная область лазерной структуры (слой InAs) выращивалась при температуре 605°C. Через емкость с TMI<sub>n</sub> проходил поток H<sub>2</sub> — 147.5 ml/min. В газовой фазе соотношение V/III = 57. Время выращивания слоя InAs составляло 1 h 55 min. Более подробно процесс выращивания лазерной структуры описан в статьях [9,10].

Из выращенных структур методом фотолитографии с последующим жидкостным химическим травлением были созданы чипы дисковых WGM-лазеров с резонатором цилиндрической формы диаметром 100–300 μm и высотой до 15 μm.

Омические контакты к полупроводниковой гетероструктуре создавались методом термического вакуумного напыления с взрывной фотолитографией. Для этого на верхний эпитаксиальный слой *p*-InAsSbP наносили последовательно металлы и сплав: Cr–Au:Zn–Au. Верхний контакт лазерного чипа представлял собой кольцо шириной 30 μm и отстоял от края резонатора на 10 μm. 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. Кристалл припаивался на корпус марки TO-18 с помощью индия, а к верхнему кольцевому контакту приваривались золотая проволочка диаметром 30 μm. Микрофотография изготовленного таким образом лазерного диода приведена на рис. 1.

Излучение собиралось параболическим отражателем. Параболический отражатель служил для сбора и фокусировки спонтанного и лазерного излучения на щель монохроматора.

Для изучения модовой структуры спектров лазеров использовался монохроматор DK-480 (CVI Laser Corp. ), и Фурье-спектрометр марки FTIR Nicolet Nexus 870 с охлаждаемыми InSb-фотодиодами. Спектры электролюминесценции лазерных диодов изучались как в импульсном,

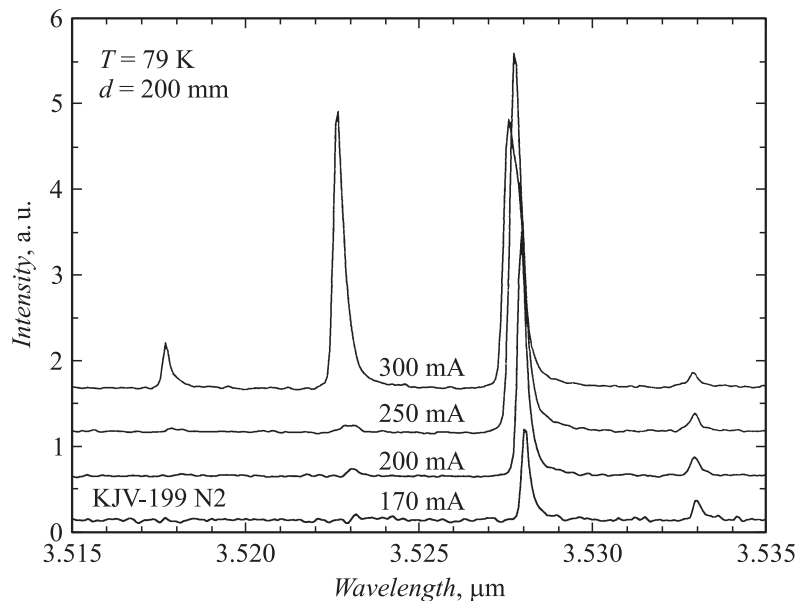


**Рис. 1.** Микрофотография чипа WGM-лазера с резонаторами в виде диска (общий вид).

так и в квазинепрерывном режиме. В импульсном режиме измерения проводились при различных длительностях импульсов от 30 ns до 2 μs, следующих со скважностью около 60. Через диоды пропускался ток величиной от 0.02 до 0.55 А. Исследования проводились в температурном интервале 77–125 К.

Была измерена серия лазеров. Все они имели диодные характеристики с напряжением отсечки  $\sim 0.4$  В и последовательным сопротивлением 0.3–0.4 Ω при температуре 79 К, как и ожидалось для исследуемой ДГС.

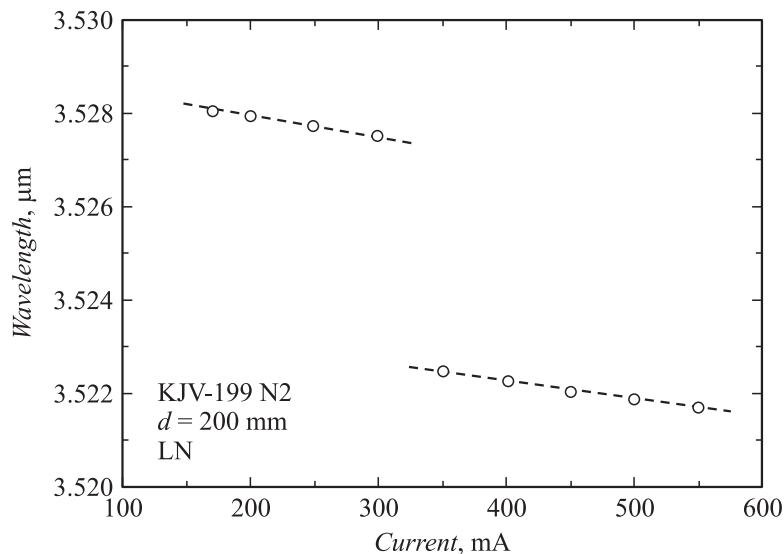
Спектры излучения, измеренные при питании лазера короткими импульсами тока (40 ns), являются многомодовыми (рис. 2). При токе 170 mA, который на 14% больше порогового, преобладает одна мода на длине волны  $\lambda = 3.5282 \mu\text{m}$ . Эта мода остается наиболее интенсивной до тока 300 mA. Рядом с ней генерируются более слабые моды, отстоящие от нее на  $\Delta\lambda = 49 \text{ \AA}$ , как должно быть для мод шепчущей галереи [2–10]. Эта мода плавно смещается с ростом тока



**Рис. 2.** Спектры когерентного излучения WGM-лазера, измеренные (спектральное разрешение  $2 \text{ \AA}$ ) в импульсном режиме (длительность импульса  $40 \text{ ns}$  и частота повторения импульса  $210 \text{ kHz}$ ) при токе накачки  $170\text{--}350 \text{ mA}$  и температуре  $79 \text{ K}$ .  $d$  — диаметр резонатора.

на  $8 \text{ \AA}$  (рис. 3). Ближайшая к ней коротковолновая мода становится преобладающей в интервале токов  $300\text{--}550 \text{ mA}$  и смещается на  $10 \text{ \AA}$  в сторону коротких длин волн с увеличением тока (рис. 3). Более слабые коротковолновые моды ведут себя приблизительно так же, а длинноволновые не смещаются, так как генерируются на переднем фронте импульса, когда ток не достигает амплитудного значения. Небольшое уширение спектров мод на длинноволновом склоне также объясняется генерацией лазера в процессе увеличения уровня возбуждения лазера.

Перескок доминирующей моды с ростом тока в коротковолновую сторону объясняется, как и в полосковых лазерах [12], увеличением концентрации неравновесных носителей заряда. Увеличение концентрации носителей заряда приводит к уменьшению коэффициента преломления в активной области, что вызывает смещение мод резонатора в корот-



**Рис. 3.** Зависимость максимума когерентного излучения WGM-лазера от тока накачки 170–350 mA при температуре 79 К.

коволновую сторону. Следовательно, плавное смещение мод шепчущей галереи происходит за счет нелинейного оптического эффекта. Процесс такого смещения мод является быстродействующим (1 ns) [13]. В нашем случае смещение наблюдается при использовании импульсов тока длительностью 40 ns. Сущность эффекта состоит в том, что концентрация неравновесных носителей заряда на краях области лазерной генерации оказывается больше, чем в ее середине, из-за отсутствия лазерного излучения. В дисковых лазерах в отличие от полосковых концентрация носителей на внутреннем крае области лазерной генерации дополнительно контролируется спонтанной рекомбинацией в средней части диска.

Это создает дополнительную возможность усиления зависимости длины волны лазерного излучения от тока, что в некоторой степени проявляется на рис. 3.

Таким образом, создан перестраиваемый инфракрасный полупроводниковый WGM-лазер с дисковым резонатором, работающий на длине волны 3.5 μm при температуре 79 К. Изучены спектры излучения. За-

регистрована плавная перестройка длины волны излучения основной моды в коротковолновую сторону на 11 Å, обусловленная нелинейными оптическими эффектами.

Работа частично поддержана программой президиума РАН № 27 „Основы фундаментальных исследований нанотехнологий и наноматериалов“, грантами РФФИ 07-02-92170-НЦНИ\_а и 08-02-90039-Бел\_а и государственным контрактом № 02.740.11.0445.

## Список литературы

- [1] *Nadezhdinskii A.I., Prokhorov A.M.* // Proc. SPIE. 1992. V. 1724. P. 78.
- [2] *Sherstnev V.V., Krier A., Monakhov A.M., Hill G.* // Electron. Lett. 2003. V. 39. P. 916–918.
- [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. 1087–1092.
- [4] *Lee P., Lu T., Tsai F.* // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 89. P. 231111.
- [5] *Norris G., Krier A., Sherstnev V.V., Monakhov A., Baranov A.N.* // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 90. P. 011105.
- [6] *Аверкиев Н.С., Астахова А.П., Гребеницкова Е.А., Ильинская Н.Д., Калинина К.В., Кижяев С.С., Кислякова А.Ю., Монахов А.М., Шерстнев В.В., Яковлев Ю.П.* // ФТП. 2009. Т. 43. В. 1. С. 124–127.
- [7] *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.
- [8] *Choi Y.S., Moon H.J., Kim S.W., An K.* // ArXiv: physics/0106032 v1, 2006.
- [9] *Именков А.Н., Шерстнев В.В., Сиповская М.А., Гребеницкова Е.А., Баскаков П.Н., Boissier G., Teissier R., Baranov A.N., Яковлев Ю.П.* // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. В. 24. С. 52–58.
- [10] *Астахова А.П., Ильинская Н.Д., Именков А.Н., Кижяев С.С., Молчанов С.С., Яковлев Ю.П.* // ФТП. 2005. Т. 39. В. 4. С. 427–502.
- [11] *Зотова Н.В., Кижяев С.С., Молчанов С.С., Воронина Т.И., Лагунова Т.С., Пушиный Б.В., Яковлев Ю.П.* // ФТП. 2003. Т. 37. В. 8. С. 980–987.
- [12] *Астахова А.П., Данилова Т.Н., Именков А.Н., Калчанова Н.М., Яковлев Ю.П.* // ФТП. 2003. Т. 37. В. 8. С. 985–995.
- [13] *Астахова А.П., Данилова Т.Н., Именков А.Н., Калинина К.В., Сиповская М.А., Яковлев Ю.П.* // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 20. С. 44–55.