

06:07

## Исследование квантово-размерных лазеров, работающих на модах шепчущей галереи, при температурах выше комнатной

© А.Н. Именков, В.В. Шерстнев, А.М. Монахов, И.В. Ковалёв,  
Н.Д. Ильинская, О.Ю. Серебренникова, R. Teissier,  
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: vic2sherstnev@gmail.com

Поступило в Редакцию 7 марта 2012 г.

Исследована температурная зависимость порогового тока и спектров излучения дисковых квантово-размерных WGM-лазеров в интервале температур 23–180°C, при этом длина волны лазерного излучения увеличивается от 2.24 до 2.42  $\mu\text{m}$ . Получено, что лазерная генерация наблюдается до 177°C. Обнаружено, что пороговый ток экспоненциально возрастает при увеличении температуры с коэффициентом в показателе экспоненты  $T_0 = 70$  К.

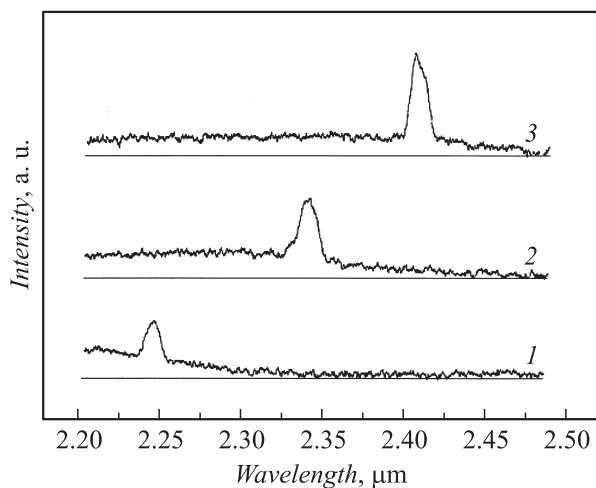
Относительно недавно [1,2] была предложена новая конструкция лазера среднего ИК-диапазона. Ее принципиальной особенностью является использование кольцевого резонатора в виде диска, рабочей модой которого служит так называемая мода шепчущей галереи или WGM (Whispering Gallery Mode)-мода. Излучение выходит из выступающей за пределы цилиндра части активной области [3].

Другая особенность исследуемых дисковых лазеров состоит в том, что в качестве активной области выбран узкозонный твердый раствор InGaAsSb, величина спин-орбитального расщепления в котором очень близка к ширине запрещенной зоны. Поэтому, наряду с прямой межзонной излучательной рекомбинацией неравновесных носителей заряда, при высоких температурах становится существенным процесс безызлучательной межзонной оже-рекомбинации, при котором выде-

ляющаяся энергия при переходе электрона из зоны проводимости в валентную зону передается не фотону, а второй дырке, возбуждающейся из валентной зоны в ее подзону (СННС-процесс). Кроме того, возможна безызлучательная рекомбинация электрона и дырки валентной зоны с отдачей энергии второму электрону, который повышает свою энергию в зоне проводимости (СНСС-процесс). Эти процессы действуют и в массивных полупроводниках и в квантово-размерных слоях. Механическое сжатие увеличивает спин-орбитальное отщепление, и тем самым может ослабить СННС-процесс, повышающий пороговый ток и снижающий рабочую температуру лазера. Данная работа посвящена исследованию работы WGM-лазеров с механически сжатой активной областью, при температурах выше комнатной.

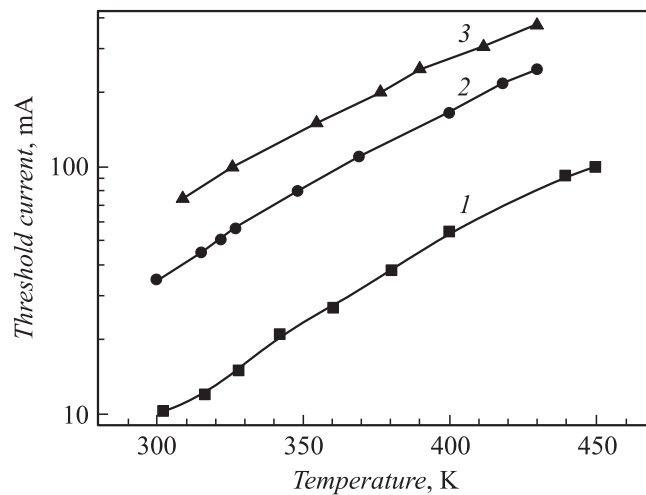
Исследуемые лазеры имеют две квантоворазмерные ямы, механически сжатые ограничительными слоями с несколько меньшей постоянной решетки (на 1.4%). Лазерная структура была выращена методом молекулярно-пучковой эпитаксии на установке RIBER Compact 21E на подложке GaSb (100) *n*-типа. Активная область общей толщиной 800 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 nm, разъединенных слоем 30 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 375 nm. Активная область преднамеренно не легировалась. Волноводные слои, в свою очередь, были ограничены широкозонными слоями *p* (Ве)- и *n* (Те)- $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}_{0.08}\text{Sb}_{0.92}$  толщиной по 1.2  $\mu\text{m}$ . Со стороны, обращенной к внешним поверхностям структуры, были выращены два тонких, по 100 nm варизонных слоя AlGaAsSb для улучшения инжекции носителей заряда в активную область. Верхний контактный слой GaSb *p*-типа имел толщину 300 nm, и был легирован до концентрации дырок  $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . Более подробно процесс выращивания лазерной структуры описан в [4].

Из созданных структур изготавливались лазерные чипы с резонатором в форме диска диаметром 100, 200 и 300  $\mu\text{m}$  и высотой 15  $\mu\text{m}$  методом фотолитографии и химического травления. Омические контакты к гетероструктуре создавались методом термического вакуумного напыления с взрывной фотолитографией. Для этого на верхний эпитаксиальный слой *p*-GaSb наносили металлы и сплав Cr–Au–Ni–Au. Верхний контакт на резонаторе представляет собой кольцо шириной 10–30  $\mu\text{m}$ , отстоящее от края резонатора на 5–10  $\mu\text{m}$ .



**Рис. 1.** Спектры излучения дискового WGM-лазера с диаметром диска  $100\ \mu\text{m}$ , при различных температурах: 1 —  $29^\circ\text{C}$ ; 2 —  $87^\circ\text{C}$ ; 3 —  $167^\circ\text{C}$ .

Со стороны подложки методом термического вакуумного напыления наносился сплошной многослойный контакт Cr–Au–Ni–Au. После напыления структура подвергалась термообработке в среде водорода для получения омического контакта и затем раскалывалась на чипы площадью  $500 \times 500\ \mu\text{m}^2$ , с дисковым резонатором в центре. Чипы спаивали подложечной стороной на корпус ТО-18 с плоским столиком. Измерялись спектры излучения лазеров вблизи порога генерации, при различных температурах от  $23$  до  $180^\circ\text{C}$ . Для этого лазер, размещенный в металлическом параболическом рефлекторе, обдувался потоком горячего воздуха. Излучение лазера фокусировалось рефлектором на щель спектрометра МДР-2. Фотоприемником выступал фоторезистор на основе сульфида свинца, электрический сигнал которого синхронно детектировался на частоте прерывания питания лазера. Лазер питался импульсами длительностью  $0.5\ \mu\text{s}$  со скважностью 16. Эти импульсы прерывались со скважностью 2 на частоте  $383\ \text{Hz}$ . Температура корпуса лазера измерялась термопарой медь–константан. Кроме того, мы учитывали дополнительный нагрев активной области лазера относительно



**Рис. 2.** Зависимости порогового тока дисковых WGM-лазеров с различными диаметрами диска: 1 — 100  $\mu\text{m}$ ; 2 — 200  $\mu\text{m}$ ; 3 — 300  $\mu\text{m}$ .

держателя за счет протекающего тока, который достигал 2–5 К при максимальном токе. Этот нагрев считался пропорциональным току.

При амплитуде импульсов тока, превышающей пороговый на 3–5% (рис. 1), наблюдается спектральная лазерная линия, которая располагается на длинноволновом склоне полосы спонтанного излучения, вблизи максимума полосы. Длина волны лазерного излучения увеличивается от 2.25 до 2.41  $\mu\text{m}$  с повышением температуры от 29 до 167°С. Изменение энергии фотонов составляет  $dh\nu/d\tau = -2.6 \cdot 10^{-4}$  eV/K, что близко к коэффициенту температурного изменения ширины запрещенной зоны материала квантовых ям активной области лазера. На рис. 2 представлены температурные зависимости логарифма порогового тока ( $I_{th}$ ) от температуры ( $T$ ). Эти зависимости удовлетворительно аппроксимируются функцией  $I_{th} \exp(T/T_0)$  с характеристической величиной  $T_0 = 70$  К.

Таким образом, показано, что дисковые WGM-лазеры могут работать при температурах, значительно превышающих комнатную (до 177°С). Зависимость порогового тока от температуры можно аппроксимировать экспонентой  $I_{th} = I_0 \exp(T/T_0)$ , где  $T_0 = 70$  К.

Работа частично поддержана программой президиума РАН № 24 „Фундаментальные основы технологий наногетероструктур и наноматериалов“, грантами РФФИ 10-02-93110-НЦНИЛ\_а, 10-02-00548-а, а также государственным контрактом № 11705.004.11.001 от 16.11.2011 г.

## Список литературы

- [1] *Sherstnev V.V., Krier A., Monakhov A.M., Hill G.* // Electron. Lett. 2003. V. 39. P. 916.
- [2] *Шерстнев В.В., Монахов А.М., Кислякова А.Ю., Яковлев Ю.П., Аверкиев Н.С.* / Известия РАН. Сер. физ. 2006. Т. 70 (3). С. 364.
- [3] *Именков А.Н., Шерстнев В.В., Монахов А.М., Гребенищикова Е.А., Головин А.С., Сиповская М.А., Старостенко Д.А., Ларченков М.И., Трошников С.И., Тарасов Д.И., Баранов А.Н., Яковлев Ю.П.* // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. (13). С. 89.
- [4] *Yarekha D.A., Glastre G., Perona A., Rouillard Y., Genty F., Skouri E.M., Boissier G., Grech P., Joulie A., Alibert C., Baranov A.N.* // Electron. Lett. 2000. V. 36. N 6. P. 537–539.