

Дисковые WGM-лазеры ($\lambda = 3.0$ мкм) на основе InAs/InAsSbP-гетероструктур, работающие в непрерывном режиме

© Н.С. Аверкиев, А.П. Астахова, Е.А. Гребенщикова, Н.Д. Ильинская, К.В. Калинина, С.С. Кижаяев, А.Ю. Кислякова, А.М. Монахов, В.В. Шерстнев[¶], Ю.П. Яковлев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 9 июня 2008 г. Принята к печати 20 июня 2008 г.)

Методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений созданы инфракрасные полупроводниковые WGM-лазеры на длину волны 3.04 мкм на основе InAs/InAsSbP-гетероструктур, работающие в непрерывном режиме. Изучены спектры излучения в интервале температур от 77 до 125 К. Лазеры имеют пороговый ток 25 мА при температуре 77 К. Созданные WGM-лазеры работают также в импульсном режиме до 125 К. Обнаружено существенное расширение динамического диапазона работы дисковых лазеров вплоть до токов, превышающих пороговый в 200 раз.

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

1. Введение

Полупроводниковые лазеры, работающие в средней инфракрасной (ИК) области спектра (2–5 мкм), 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 [1,2]. Основным недостатком лазеров среднего ИК диапазона (3–4 мкм) является низкая рабочая температура (менее 200 К). Одним из перспективных направлений создания ИК-лазеров, работающих при комнатной температуре, являются так называемые WGM-лазеры [3–8]. Описанные в этих работах 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. Лазеры, исследованные в работах [4,6–8], были изготовлены из структур, выращенных методом жидкофазной эпитаксии, и работали только в импульсном режиме.

Полупроводниковые лазеры имеют два основных компонента: активную среду, в которой свет генерируется благодаря внешнему источнику энергии, и лазерный резонатор, который содержит активный материал и обеспечивает обратную связь для вынужденного излучения света. Одним из способов достижения генерации лазеров, активная область которых обладает недостаточно большим коэффициентом оптического усиления, является повышение добротности резонатора. Это особенно актуально для лазеров диапазона 2–5 мкм, где оптическое усиление стандартной активной среды невелико. Добротность дисковых резонаторов может достигнуть величины 10^6 [9], что позволяет считать, что такие резонаторы могут найти применение для создания полупроводниковых лазеров среднего ИК диапазона.

Цель настоящей работы — создание методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений (МО-ГФЭ) дискового WGM-лазера на длину волны 3.04 мкм на основе InAs/InAsSbP-гетероструктур, работающего в непрерывном режиме, и исследование его спектральных зависимостей генерации.

2. Создание образцов и методика эксперимента

Для решения поставленной задачи была выращена лазерная структура методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений (МОГФЭ) при атмосферном давлении в реакторе горизонтального типа. В качестве газа-носителя применялся водород. Подложки InAs (100) с проводимостью *n*-типа ($n \approx 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) во время роста располагались на графитовом подложкодержателе. Для достижения необходимой температуры на поверхности подложки применялось резистивное нагревательное устройство.

Лазерная структура состояла из подложки InAs, на которой последовательно выращивался широкозонный эмиттерный слой *n*-InAs_{0.65}Sb_{0.11}P_{0.24} толщиной 2.3 мкм, активная область структуры (преднамеренно не легированный слой *n*-InAs толщиной 0.45 мкм с концентрацией носителей заряда $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) и широкозонный эмиттерный слой *p*-InAs_{0.65}Sb_{0.11}P_{0.24} толщиной 2.85 мкм, легированный Zn. Концентрация носителей заряда в широкозонных слоях *n*- и *p*-типа составляла $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ соответственно.

В качестве источника индия применялся триметилиндий (*TMI*n). Источниками элементов V группы — Sb, As, P — являлись соответственно триметилантимонид (*TMS*b) и гидридные газы — AsH₃, PH₃, разбавленные в водороде до концентрации 20%. Для получения проводимости *p*-типа в эпитаксиальных слоях использовалась легирующая примесь Zn. В качестве источника Zn применялся диэтилцинк *DeZn*. Во время роста емкости с металлорганическими соединениями поддерживались

[¶] E-mail: v.sherstnev@mail.ioffe.ru

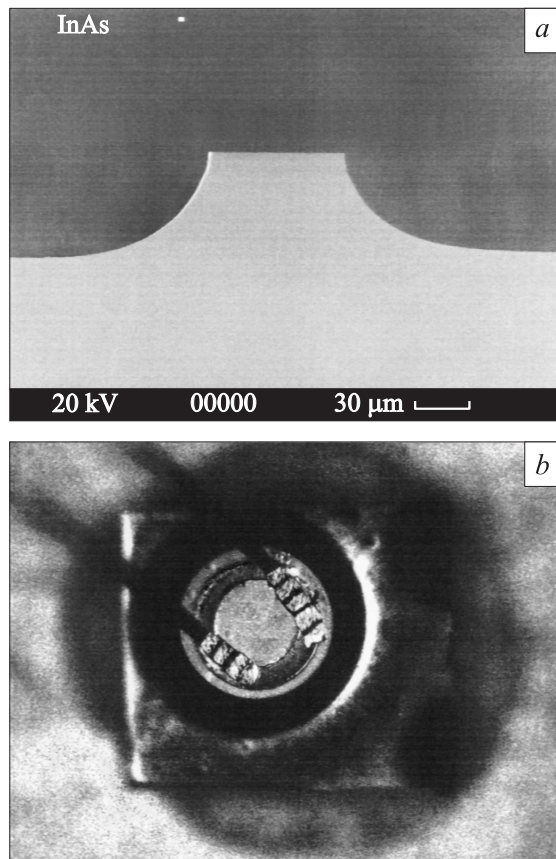


Рис. 1. Микрофотографии дискового WGM-лазера. *a* — скол диска (вид сбоку), *b* — лазерного диода (вид сверху).

при следующих температурах, °C: T_{MIn} — 20, T_{MSb} — (–9), $DeZn$ — 3.8.

Эмиттерные слои InAsSbP синтезировались при температуре 580°C. Поток H_2 через емкости с T_{MIn} и T_{MSb} составлял в данном случае 602 и 27 мл/мин 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_2 — 33.5 мл/мин. Время выращивания для обоих эмиттерных слоев InAsSbP составляло 3 ч 20 мин.

Активная область лазерной структуры (слой InAs) выращивалась при температуре 605°C. Через емкость с T_{MIn} проходил поток H_2 — 147.5 мл/мин. В газовой фазе соотношение $V/III = 57$. Время выращивания слоя InAs составило 1 ч 55 мин. Более подробно процесс выращивания лазерной структуры описан в статьях [10,11].

Для формирования омических контактов к *p*-InAsSbP методом термического вакуумного напыления последовательно наносили трехслойное покрытие Cr–Au:Zn–Au на эпитаксиальный слой. Нижний слой хрома служил для улучшения адгезии последующих

слоев. Верхний контакт представлял собой кольцо диаметром 180 мкм, шириной 30 мкм, отстоящее от края диска на 10 мкм. Со стороны подложки наносился сплошной многослойный Cr–Au:Te–Au-контакт методом термического вакуумного напыления. После напыления структура подвергалась термообработке в среде водорода для сплавления металлических слоев. Из выращенных структур методом фотолитографии с последующим химическим травлением были созданы чипы дисковых WGM-лазеров с резонатором цилиндрической формы диаметром 200 мкм и высотой до 30–40 мкм.

Сформированные мезы с ровной, полированной боковой поверхностью характеризовались отсутствием выступов, раковин и прочих неровностей на боковой поверхности. Кристалл припаивался на корпус TO-18 с помощью индия, а к верхнему кольцевому контакту приваривались две золотые проволоочки диаметром 30 мкм. Микрофотография скола диска и лазерного диода приведена на рис. 1.

Излучение собиралось параболическим отражателем. Была собрана и измерена серия лазеров, все они имели диодные характеристики с напряжением отсечки ~ 0.3 В при $T = 77$ К и дифференциальное сопротивление 1.2–1.4 Ом.

Спектры электролюминесценции лазерных диодов изучались в импульсном и квазинепрерывном режиме. В импульсном режиме измерения проводились при различных длительностях импульса от 50 нс до 20 мкс и частоте их следования от 1 до 32 кГц. Через диоды пропускался ток величиной от 0.02 до 5 А. Исследования проводились в температурном интервале 77–125 К.

Для изучения спектров лазеров использовался монохроматор DK-480 (CVI Laser Corp.). Излучение регистрировалось охлаждаемым 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.

3. Экспериментальные результаты

Созданные лазеры работают в непрерывном режиме и имеют низкие пороговые токи генерации ~ 25 мА при температуре 77 К. На рис. 2 показан типичный спектр когерентного излучения лазера с диаметром резонатора 200 мкм. Видно, что излучение имеет многомодовую структуру с эквидистантными пиками, причем расстояние между модами составляет приблизительно 40 \AA , что хорошо согласуется с известной формулой для межмодового расстояния мод шепчущей галереи [4]:

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

где R — радиус дискового резонатора, равный в нашем случае 100 мкм, $n = 3.5$ — коэффициент преломления

света в активной области волновода. При подстановке значений этих параметров в наш случай получили $d\lambda = 40 \text{ \AA}$.

Была исследована спектральная зависимость интенсивности излучения от тока через прибор. Выяснилось,

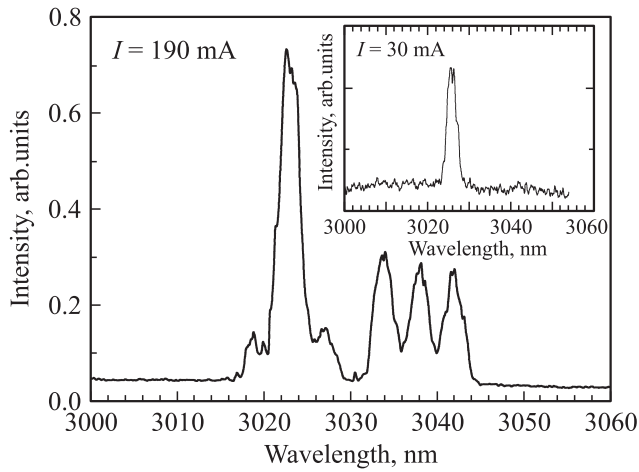


Рис. 2. Спектр когерентного излучения лазера (спектральное разрешение 15 \AA), измеренный в квазинепрерывном режиме (частота повторения импульса 512 Гц) при токе накачки 190 mA . На вставке — спектр при токе накачки 30 mA . $T = 77 \text{ K}$.

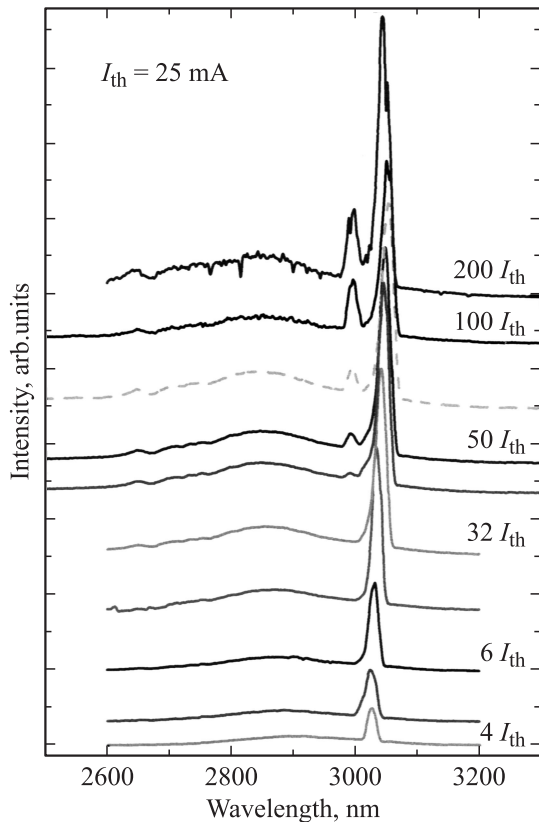


Рис. 3. Спектры излучения лазера (спектральное разрешение 150 \AA), измеренные при различной величине тока накачки (длительность импульса 500 ns и частота повторения импульса 32 кГц). $T = 77 \text{ K}$.

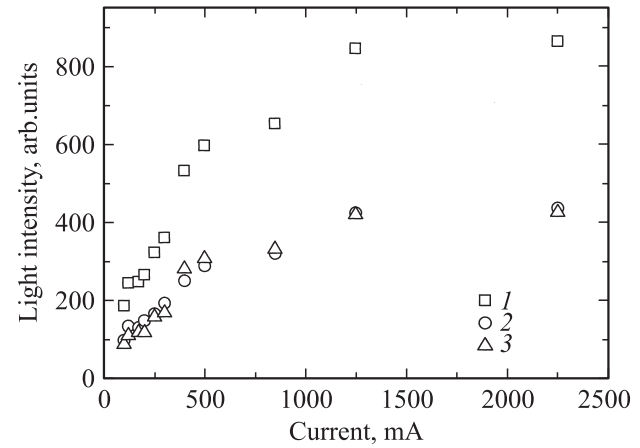


Рис. 4. Интегральные зависимости полной интенсивности (1), интенсивности спонтанного (2) и интенсивности когерентного (3) оптического излучения от тока.

что лазерное излучение сохраняется вплоть до токов, превышающих пороговый в 200 раз. Спектры излучения от токов приведены на рис. 3.

На рис. 4 показаны зависимости интегральной интенсивности, интенсивности спонтанного и когерентного оптического излучения от полного тока. Видно, что вплоть до токов 2500 mA оптическая мощность растет сублинейно, что говорит о суперлинейном росте безызлучательных потерь. Такое поведение интегральной интенсивности можно объяснить процессами ожереккомбинации в активной области [12]. Отметим, что во всем диапазоне токов интенсивности спонтанного и вынужденного излучения равны.

Следует подчеркнуть, что стандартные полосковые лазеры из аналогичного материала перестают работать при токах порядка 10 пороговых. Увеличение динамического диапазона по току более чем на порядок для дисковых лазеров можно объяснить тем, что в дисковых лазерах моды являются бегущими волнами. Если в полосковом лазере в пучностях стоячей волны возникает пробой либо выжигание носителей, то в дисковом лазере такие явления происходят при гораздо больших плотностях тока. Кроме того, в дисковых лазерах есть возможность переключения на другую моду с близкой длиной волны, но расположенную геометрически в другой области резонатора (ближе к центру диска) [8].

На рис. 5 приведена температурная зависимость спектров излучения лазеров с диаметром диска 200 мкм в интервале температур от 85 до 125 K , работающих в импульсном режиме. Поскольку при повышении температуры внешняя квантовая эффективность лазерного излучения падает, для определения максимальной рабочей температуры измерения проводились с низким спектральным разрешением и отдельные WGM-моды на спектре не видны, а регистрируется только огибающая по группам мод. Видно, что во всем интервале температур спектр излучения плавно смещается в длинновол-

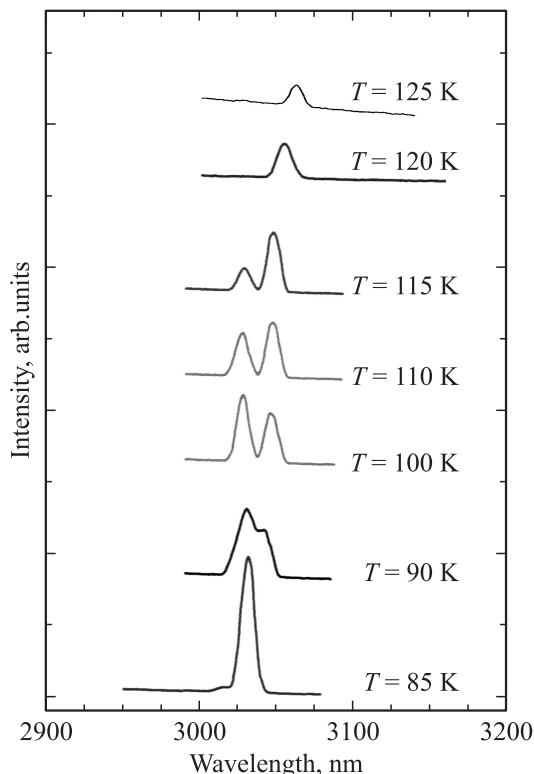


Рис. 5. Температурная зависимость спектров излучения лазеров (спектральное разрешение 80 \AA) с диаметром диска $200 \mu\text{м}$ (для импульсного режима при длительности импульса 2.0 мкс и частоте повторения импульса 8 кГц).

новую сторону. При температуре $T = 85 \text{ К}$ имеем два максимума 3015.4 и 3030.7 нм , при $T = 100 \text{ К}$ — 3030.0 и 3045.3 нм , при $T = 115 \text{ К}$ — 3027.7 и 3046.1 нм , а при максимальной температуре ($T = 125 \text{ К}$) остается только одна группа мод 3061.1 нм .

4. Заключение

Созданы инфракрасные полупроводниковые WGM-лазеры на длину $3.04 \mu\text{м}$ на основе InAs/InAsSbP-гетероструктур, выращенных методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений (МОГФЭ), работающие в непрерывном режиме. Лазеры имеют рекордно низкие пороговые токи генерации $\sim 25 \text{ мА}$ при температуре 77 К и работают до $11 I_{\text{th}}$ в непрерывном режиме и до $200 I_{\text{th}}$ в импульсном режиме. Изучены спектральные зависимости генерации в интервале температур от 77 до 125 К . Показано, что динамический диапазон дисккового лазера существенно превышает динамический диапазон полоскового лазера, изготовленного из того же материала. Обнаружено, что при больших уровнях токовой накачки ($I_{\text{th}} > 50$) наблюдается возникновение высокоэнергетической группы мод, сдвинутой на величину $\sim 400\text{--}500 \text{ \AA}$.

Работа частично поддержана грантами РФФИ № 07-02-13616-офи_ц, 07-02-92170-НЦНИ_а, 08-02-90039-Бел_а и программой „Участник молодежного научно-инновационного конкурса“ за 2007 г.

Список литературы

- [1] A.I. Nadezhdinskii, A.M. Prokhorov. Proc. SPIE, **1724**, 78 (1992).
- [2] A.I. Nadezhdinskii. Infr. Phys. Technol., **7**(1), 99 (1996).
- [3] A.F.J. Levi, R.E. Slusher, S.L. McCall, S.J. Pearton, W.S. Hobson. Appl. Phys. Lett., **62**, 2021 (1993).
- [4] V.V. Sherstnev, A. Krier, A.M. Monakhov, G. Hill. Electron. Lett., **39**, 916 (2003).
- [5] S. Anders, W. Schrenk, E. Gornik, G. Strasser. Appl. Phys. Lett., **80**, 4094 (2002).
- [6] В.В. Шерстнев, А.М. Монахов, А.П. Астахова, А.Ю. Кислякова, Ю.П. Яковлев, Н.С. Аверкиев, А. Krier, G. Hill. ФТП, **39**(9), 1087 (2005).
- [7] V.V. Sherstnev, A.M. Monakhov, A. Krier, D.A. Wright. IEE Proc. Optoelectron. **152**(1) (2005).
- [8] N.S. Averkiev, V.V. Sherstnev, A.M. Monakhov, E.A. Grebenshchikova, A.Yu. Kislyakova, Yu.P. Yakovlev, A. Krier, D.A. Wright. Low Temp. Phys., **33**(2–3), 283 (2007).
- [9] D.A. Cohen, M. Hossein-Zadeh, A.F.J. Levi. Sol. St. Electron., **45**, 1577 (2001).
- [10] А.П. Астахова, Н.Д. Ильинская, А.Н. Именков, С.С. Кижжев, С.С. Молчанов, Ю.П. Яковлев. ФТП, **39**(4), 497 (2005).
- [11] Н.В. Зотова, С.С. Кижжев, С.С. Молчанов, Т.И. Воронина, Т.С. Лагунова, Б.В. Пушный, Ю.П. Яковлев. ФТП, **37**(8), 980 (2003).
- [12] S. Kim, M. Erdtmann, D. Wu, E. Kass, H. Yi, J. Diaz, M. Razeghi. Appl. Phys. Lett., **69**(11), 1614 (1996).

Редактор Л.В. Беляков

Disk WGM lasers ($\lambda = 3.0 \mu\text{м}$) based on InAs(Sb)/InAsSbP heterostructures, operating at continuous-wave regime

N.S. Averkiev, A.P. Astakhova, E.A. Grebenshchikova, K.V. Kalinina, S.S. Kizhaev, A.Yu. Kislyakova, N.D. Il'inskaya, A.M. Monakhov, V.V. Sherstnev, Yu.P. Yakovlev

loffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract IR WGM semiconductor lasers for $3.04 \mu\text{м}$ operating wavelength based on InAs/InAsSbP heterostructures have been grown by metallorganic vapor phase epitaxy operating in continuous wave (CW) regime. The emitting spectra of the devices have been studied in the temperature range between 77 and 125 К . It was found that the lasers operated in CW regime have 25 мА threshold current at 77 К . The lasers operate in pulse regime up to 125 К . The considerable increase of operating current dynamic range has been revealed. The disk lasers operate up to the currents exceed the threshold one in 200 times.