

07:08

Лазерная генерация вертикальных микрорезонаторов с массивами квантовых точек InAs/InGaAs на длине волны $1.3\ \mu\text{m}$ при оптической накачке

© С.А. Блохин¹, Н.В. Крыжановская², Э.И. Моисеев²,
М.А. Бобров¹, А.Г. Кузьменков^{1,3}, А.А. Блохин¹,
А.П. Васильев^{1,3}, И.О. Карповский^{1,4}, Ю.М. Задиранов¹,
С.И. Трошков¹, В.Н. Неведомский¹, Е.В. Никитина²,
Н.А. Малеев¹, В.М. Устинов^{1,3}

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

² Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет РАН

³ Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур РАН, Санкт-Петербург

⁴ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
E-mail: blokh@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 20 мая 2016 г.

Исследована принципиальная возможность достижения температурной стабильности лазерных излучателей спектрального диапазона $1.3\ \mu\text{m}$ с вертикальным оптическим микрорезонатором и активной областью на основе квантовых точек (КТ) InAs/InGaAs. Показано, что в случае использования нелегированного гибридного вертикального оптического микрорезонатора с нижним нелегированным полупроводниковым и верхним диэлектрическим распределенными брэгговскими отражателями, для активной области на основе девяти слоев КТ при оптимальном спектральном рассогласовании положения максимума усиления основного состояния КТ и резонансной длины волны возможно обеспечить лазерную генерацию вплоть до температур $\sim 100^\circ\text{C}$ при практически неизменном уровне пороговой мощности накачки.

Несмотря на ряд успешных демонстраций лабораторных образцов полупроводниковых вертикально-излучающих лазеров (ВИЛ) спектрального диапазона $1.3\ \mu\text{m}$ на подложках арсенида галлия, проблема разработки воспроизводимой и надежной технологии создания таких

приборов остается нерешенной [1]. В качестве одного из перспективных вариантов активной области для таких приборов активно исследовались структуры с квантовыми точками (КТ) в системе материалов InGaAs, однако реализованные ВИЛ обладали недостаточной температурной стабильностью, в первую очередь, из-за недостаточного оптического усиления основного состояния КТ и термического выброса носителей в матрицу окружающего материала из активной области оптического микрорезонатора [2–4]. Настоящая работа посвящена исследованию принципиальной возможности достижения хорошей температурной стабильности лазерных излучателей с КТ InGaAs, реализованных в вертикальной геометрии оптического микрорезонатора с минимальными оптическими потерями. Для выполнения последнего условия использована полностью нелегированная структура микрорезонатора, позволяющая исключить потери на свободных носителях, и оптическая схема накачки (далее О-ВИЛ).

Все исследуемые образцы были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) на подложках GaAs с ориентацией (001). Для смещения спектра усиления активной области в спектральный диапазон $1.3 \mu\text{m}$ слой КТ InAs, сформированный непосредственно на поверхности GaAs в режиме роста Странски–Крастанова, зарациивался слоем InGaAs (квантовой ямой) с низким (0.1–0.15) содержанием индия (далее КТ InAs/InGaAs) [5]. Температура подложки составляла $\sim 485^\circ\text{C}$ для слоев КТ InAs/InGaAs и $\sim 590^\circ\text{C}$ для остальной части структуры. Формирование КТ контролировалось с помощью наблюдения картины дифракции быстрых электронов. Максимум излучения основного перехода формируемых КТ InAs/InGaAs при комнатной температуре находится на длине волны $1.28\text{--}1.29 \mu\text{m}$. Согласно исследованиям методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на микроскопе JEOL JEM 2100F при ускоряющем напряжении 200 kV (данные не приведены), не было выявлено образование дислокаций в упругонапряженных массивах КТ и/или формирование протяженных дефектов, связанных с подложкой, что свидетельствует о бездислокационном росте КТ (плотность прорастающих дислокаций ниже предела обнаружения метода, т.е. менее $5 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-2}$). Анализ изображения показывает, что высота образовавшихся островков InAs лежит в диапазоне $4.3\text{--}5.4 \text{ nm}$, что заметно меньше толщины покрывающего слоя InGaAs, и наблюдается полное зарациивание КТ слоем InGaAs (т.е. КТ находятся в узкозонной матрице InGaAs). Полученные мас-

сивы КТ InAs/InGaAs обладают поверхностной плотностью более $3 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$, что значительно выше по сравнению с длинноволновыми КТ InGaAs, но недостаточно для обеспечения высокого материального усиления [6]. Возможное решение связано с применением технологии вертикального складирования слоев КТ, однако данный подход сопряжен с риском локальной релаксации напряжений при формировании слоя КТ в полях напряжений нижележащего слоя КТ (образование дислокаций), а также нежелательной модификации зонной структуры КТ [7]. Согласно ПЭМ-исследованиям, при толщине слоев GaAs, разделяющих слои КТ InAs/InGaAs, превышающей 25 nm, положения точек в вышележащих слоях КТ оказываются некоррелированными с нижележащими, и модификации структурных параметров КТ в вышележащих слоях не наблюдается. Более того, сохраняется высокая интенсивность линии фотолюминесценции в диапазоне длин волн $1.3 \mu\text{m}$ без увеличения ее полуширины по сравнению со структурами, содержащими одиночный слой КТ (типичная полуширина линии менее 35 meV).

В настоящем исследовании для реализации О-ВИЛ была использована конструкция гибридного вертикального микрорезонатора с активной областью на основе девяти слоев КТ InAs/InGaAs (далее КТ InAs/InGaAs О-ВИЛ), состоящая из нижнего нелегированного GaAs/Al_{0.9}Ga_{0.1}As распределенного брэгговского отражателя (РБО), оптического микрорезонатора с активной областью, верхнего диэлектрического РБО на основе семи пар четвертьволновых слоев SiO₂/TiO₂ (сформированных методом магнетронного распыления). Для предотвращения поверхностной рекомбинации неравновесных носителей на границе полупроводник–диэлектрик активная область микрорезонатора с обеих сторон ограничивалась 15-nm барьерами AlAs. С целью обеспечения высокого фактора перекрытия профиля распределения стоячей волны и светоизлучающих слоев активной области было решено в пределах одной пучности стоячей волны складировать три слоя КТ InAs/InGaAs с толщиной разделяющего слоя 30 nm. При этом первая часть разделяющего слоя GaAs, предназначенная для консервации формы КТ InAs/InGaAs, выращивалась при температуре 485°C, а остальная часть — при температуре 590°C. Толщины и составы слоев КТ InAs/InGaAs О-ВИЛ оптимизированы для получения интенсивной фотолюминесценции на длине волны $\sim 1300 \text{ nm}$.

Оптическая накачка осуществлялась с помощью YAG:Nd-лазера, работающего на второй гармонике в непрерывном режиме на длине

волны 527 nm. Оптическая схема установки микрофотолюминесценции (микроФЛ, μ PL) построена таким образом, что один и тот же объектив Olympus LMPlan 50xIR NA = 0.55 используется как для накачки, так и для сбора сигнала от образца. Лазерный луч фокусировался на поверхности образца в пятно диаметром 2–3 μ m. Мощность излучения оптической накачки, падающего непосредственно на поверхность образца, варьировалась в диапазоне 0.1–20 mW. Детектирование сигнала производилось с помощью монохроматора FHR 1000 и многоканального охлаждаемого InGaAs-фотодетектора Horiba Symphony (разрешение 0.05 nm). Для исследований при повышенной температуре структуры монтировались с помощью теплопроводящей пасты на нагревательный элемент, температура которого регулировалась с помощью контроллера TPM10.

На рис. 1, *a* представлены спектры микроФЛ КТ InAs/InGaAs О-ВИЛ при различной мощности оптической накачки и температуре 20°C. При малом уровне накачки наблюдается широкий пик *A* на длине волны λ_0 , соответствующей резонансной длине волны вертикального микрорезонатора. Несимметричность формы спектра обусловлена большим углом сбора сигнала. По мере увеличения мощности накачки наблюдается заужение линии пика *A* и появление коротковолнового пика *B*. В конструкции КТ InAs/InGaAs О-ВИЛ не предусмотрено наличие поперечного оптического ограничения, поэтому возникновение пика *B*, по-видимому, обусловлено эффектом тепловой линзы (вследствие разогрева лазерным излучением), приводящей к формированию эффективного волновода с определенным модовым составом, т.е. пики *A* и *B* соответствуют модам резонатора [8]. Спектры обеих мод демонстрируют небольшое (~ 0.15 nm) расщепление, обусловленное частичным снятием вырождения по поляризации. Следует отметить, что при использовании короткофокусного объектива большой вклад в общий детектируемый сигнал дает спонтанное излучение как через состояния КТ, так и через состояния квантовой ямы и матрицы, поэтому анализ абсолютных значений мощностных характеристик излучения затруднен. На рис. 1, *b* приведены зависимости ширины линии на полувысоте (FWHM) и ее интенсивности от мощности оптического возбуждения для моды *A*, измеренные при температуре 20°C. При увеличении плотности возбуждения наблюдается резкое уменьшение ширины линии моды *A* до уровня ~ 0.15 nm, сопровождающееся возрастанием ее интенсивности, носящим пороговый характер. Оба

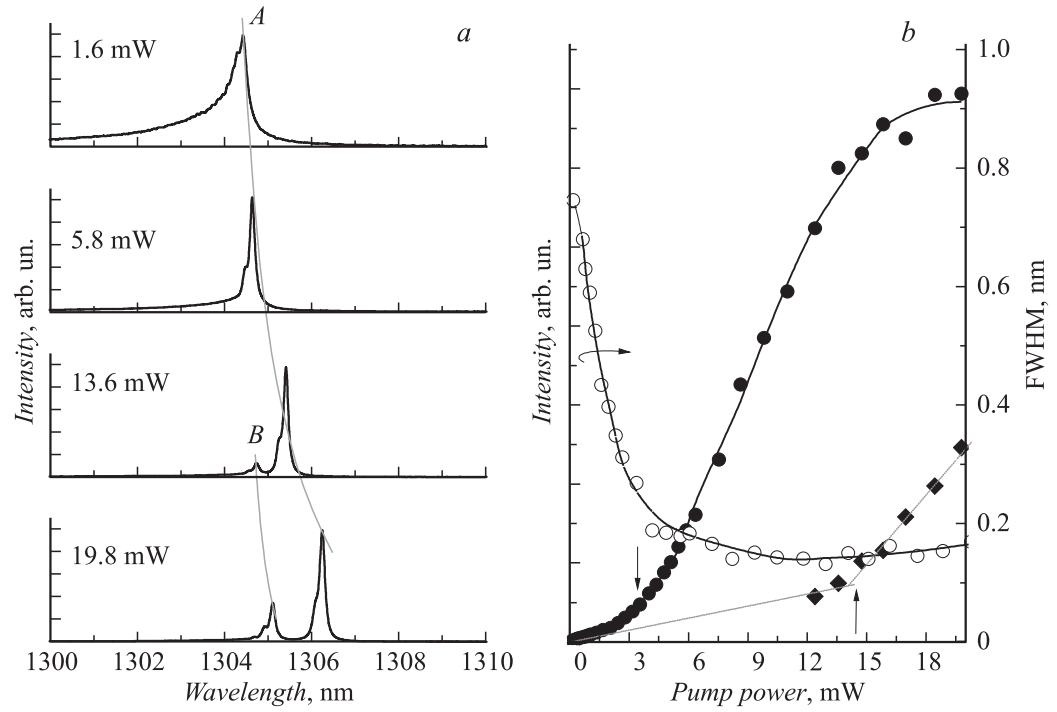


Рис. 1. Данные микроФЛ КТ InAs/InGaAs О-ВИЛ при температурах 20° (*a, b*) и 100°С (*c, d*): *a, c* — спектры микроФЛ при разной мощности оптической накачки; *b, d* — зависимости интенсивности пиков *A* (●) и *B* (◆), а также ширины на полувысоте для пика *A* (○) от мощности оптического возбуждения. Маркерами помечены пороги лазерной генерации для пиков *A* и *B*.

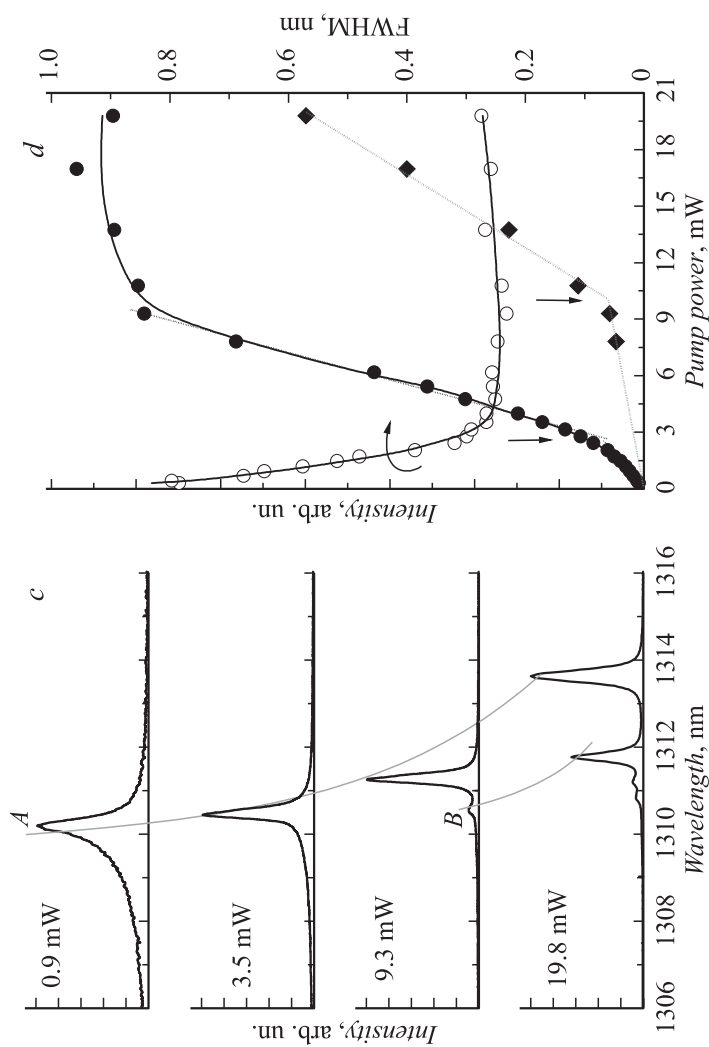


Рис. 1 (продолжение).

факта свидетельствуют о возникновении стимулированного излучения с пороговой мощностью возбуждения $\sim 3.5 \text{ mW}$ (переход в режим лазерной генерации). По мере роста накачки наблюдается насыщение интенсивности моды *A*, сопровождающееся ростом интенсивности моды *B*, также имеющем пороговый характер (пороговая мощность возбуждения $\sim 14.5 \text{ mW}$).

При повышении температуры наблюдается падение скорости нарастания интенсивности линии моды *A* с ростом мощности накачки (характеристика, аналогичная дифференциальной эффективности), однако лазерная генерация КТ InAs/InGaAs О-ВИЛ при оптической накачке сохраняется вплоть до температуры $\sim 100^\circ\text{C}$ (рис. 1, *c, d*). Ширина линии с ростом мощности накачки уменьшается до уровня 0.25 nm . Более того, пороговая мощность накачки, необходимая для появления генерации на резонансной длине волны, по сравнению с измерениями при комнатной температуре уменьшилась до уровня $\sim 2.5 \text{ mW}$, что можно объяснить большим спектральным рассогласованием спектра усиления (по положению пика фотолюминесценции основного состояния КТ) относительно положения резонанса вертикального микрорезонатора. В то же время при повышенной температуре насыщение интенсивности моды *A* наблюдается при меньших мощностях оптической накачки, а генерация через моду *B* начинается уже при мощности оптической накачки менее 10 mW . Это свидетельствует о падении абсолютных значений оптического усиления основного состояния КТ при повышенных температурах.

Отличительной особенностью для исследуемых лазерных структур является увеличение межмодового расстояния с ростом мощности накачки, причем при повышенной температуре данный эффект значительно усиливается (рис. 2, *a*). Учитывая заметный длинноволновый сдвиг мод с ростом мощности накачки, обнаруженное поведение, по видимому, обусловлено температурными эффектами аналогично случаю инжекционных ВИЛ [9]. В самом деле, лазерная накачка пучком с гауссовым распределением интенсивности ведет к локальному разогреву активной области и формированию эффективного градиентного оптического волновода с гауссовым профилем показателя преломления, при этом с ростом мощности оптической накачки увеличивается разогрев оптического микрорезонатора. Наблюдаемый сдвиг длины волны моды *A* с температурой обусловлен температурной зависимостью показателей преломления слоев вертикального микрорезонатора

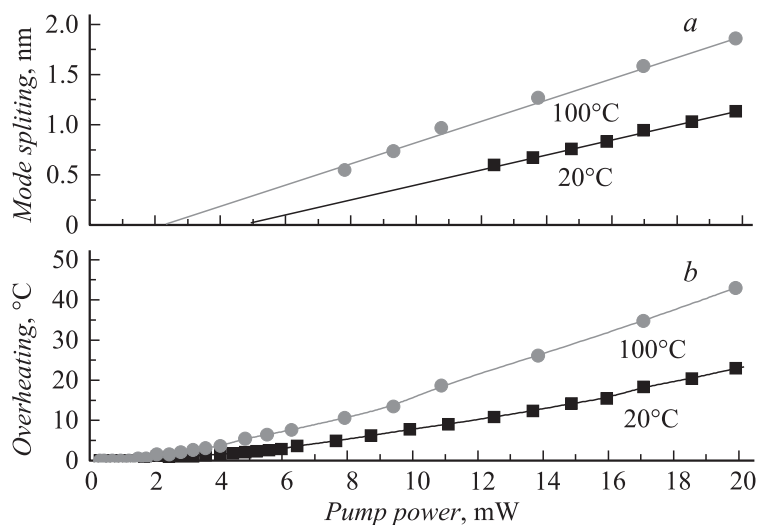


Рис. 2. Межмодовое расстояние (*a*) и усредненное значение перегрева микрорезонатора (*b*) в зависимости от мощности оптической накачки для КТ InAs/InGaAs О-ВИЛ при температурах 20 и 100°C.

и составляет ~ 0.08 nm/K при низкой мощности оптической накачки. Величина перегрева активной области КТ InAs/InGaAs О-ВИЛ, приведенная на рис. 2, *b*, была оценена из анализа изменения длины волны моды *A* с ростом мощности накачки. Видно, что при одной и той же мощности оптической накачки перегрев активной области при повышенной температуре держателя образца оказывается в два раза выше, что, вероятно, обусловлено падением теплопроводности слоев AlGaAs с ростом температуры [10]. Данный факт способствует более раннему насыщению интенсивности моды *A* с ростом уровня накачки при повышенной температуре. Согласно результатам моделирования модового состава для такого эффективного градиентного волновода, фундаментальная мода (мода *A*) локализована в центре (в сердцевине), тогда как мода высшего порядка (мода *B*) локализована преимущественно на краях (ближе к обкладкам). В результате эффективные показатели преломления для двух рассматриваемых мод с ростом температуры увеличиваются с разной скоростью, что приводит к наблюдаемому

увеличению межмодового расстояния. Решение обратной задачи без точного расчета реального профиля распределения температуры позволяет оценить характерный диаметр градиентного волновода $\sim 8 \mu\text{m}$ по уровню $1/e^2$. При измеренной величине коэффициента отражения излучения накачки на уровне 0.3 доля поглощаемой мощности в материале активной области микрорезонатора достигает 67%. В предположении 100% эффективности инжекции носителей и доминирования излучательной рекомбинации оценка уровня пороговой плотности мощности при оптической накачке дает значения $3.3\text{--}4.7 \text{ kW/cm}^2$ в диапазоне рабочих температур $20\text{--}100^\circ\text{C}$, что соответствует пороговой плотности тока $1.4\text{--}2 \text{ kA/cm}^2$ при инжекционной накачке. Таким образом, для исследуемой структуры вертикального микрорезонатора с массивами КТ InAs/InGaAs при оптической накачке возможно обеспечить лазерную генерацию на длине волны $1.3 \mu\text{m}$ вплоть до температур $\sim 100^\circ\text{C}$ при низком и достаточно стабильном уровне пороговой мощности накачки, а проблема получения лазерной генерации в инжекционном ВИЛ в большей степени связана с минимизацией потерь на свободных носителях.

Авторы выражают благодарность ООО „Коннектор Оптик“ за помощь в синтезе эпитаксиальных структур. ПЭМ-измерения выполнены с использованием оборудования федерального ЦКП „Материаловедение и диагностика в передовых технологиях“ (ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург).

Работа выполнялась при частичной поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках Федеральной целевой программы „Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы“, шифр 2015-14-588-0005, соглашение № 14.616.21.0051, уникальный идентификатор RFMEFI61615X0051.

Список литературы

- [1] Michalzik R. VCSELs: Fundamentals, Technology and Applications of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers. Berlin: Springer-Verlag, 2013. P. 560.
- [2] Lott J.A., Ledentsov N.N., Ustinov V.M. et al. // Electron. Lett. 2000. V. 36 (16). P. 1384.

- [3] *Gilet P., Pougeoise E., Grenouillet L.* et al. // Proc. SPIE 6484. Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers XI. 2007. P. 64840F.
- [4] *Xu D.W., Ding Y., Tong C.Z.* et al. // Photon. Technol. Lett. 2009. V. 21 (17). P. 1211.
- [5] *Ustinov V.M., Maleev N.A., Zhukov A.E.* et al. // Appl. Phys. Lett. 1999. V. 74 (19). P. 2815.
- [6] *Ustinov V.M., Zhukov A.E., Egorov A.Y., Maleev N.A.* Quantum dot lasers. Oxford: Oxford University Press, 2003. P. 300.
- [7] *Устинов В.М.* // ФТП. 2004. Т. 38. В. 8. С. 963–970.
- [8] *Nakwaski W., Sarzala R.P.* // Opt. Commun. 1998. V. 148 (1–3). P. 63–69.
- [9] *Brunner M., Gulden K., Hövel R.* et al. // Appl. Phys. Lett. 2000. V. 76 (1). P. 7.
- [10] *Blakemore J.S.* // J. Appl. Phys. 1982. V. 53 (10). P. R123–R181.