

06.2;06.3

Мощные одномодовые лазерные диоды с длинами волн излучения $\lambda = 1.7-1.8 \mu\text{m}$

© А.В. Лютецкий, Н.А. Пихтин, С.О. Слипченко, Н.В. Фетисова,
А.Ю. Лешко, Е.Г. Голикова, Ю.А. Рябоштан, И.С. Тарасов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург
E-mail: nike@hpld.ioffe.rssi.ru
АО «Сигма Плюс», Москва

Поступило в Редакцию 21 ноября 2002 г.

Методом гидридной эпитаксии из металлоорганических соединений были изготовлены квантово-размерные InGaAsP/InP гетероструктуры с отдельным ограничением. На базе выращенных гетероструктур созданы мощные одномодовые лазерные диоды мезаполосковой конструкции с длиной волны генерации $\lambda = 1.7-1.8 \mu\text{m}$. Максимальная непрерывная мощность излучения при комнатной температуре составила 150 мВт с сохранением одномодового режима генерации вплоть до 100 мВт.

Спектральный диапазон длин волн $1.7-2.0 \mu\text{m}$ привлекает к себе внимание из-за усиленно развивающихся систем связи со сверхнизкими внутренними оптическими потерями [1], систем экологического мониторинга окружающей среды [2] и систем спектроскопии промышленных газов [3]. Востребованность мощных одномодовых лазеров в перечисленных системах возрастает с каждым днем.

На данный момент существует две возможности для реализации лазерных диодов в средней инфракрасной области спектра. Первая — это изготовление лазерного диода в системе твердых растворов AlInGaAsSb/GaSb [4,5]. Вторая — это использование InGaAsP/InP системы твердых растворов [2,6,7]. Вторым подходом по ряду причин считается наиболее технологичным для изготовления лазерных диодов с длиной волны генерации до $2 \mu\text{m}$ [8]. Вместе с тем появились работы, посвященные исследованию твердых растворов InAsN [9,10] с целью создания лазерных диодов, излучающих в диапазоне $1.7-2.0 \mu\text{m}$. Однако они носят пока поисковый характер и не позволяют оценить реальные перспективы этой системы твердых растворов.

Представленная работа расширяет область применений концепции мощных полупроводниковых лазеров [11–16] на диапазон длин волн $1.7\text{--}1.8\ \mu\text{m}$, успешно освоенный разработчиками мощных лазерных диодов [1–3,6–8]. В работе представлены исследования свойств одномодовых лазерных диодов с длиной волны излучения $1.7\text{--}1.8\ \mu\text{m}$, изготовленных на базе InGaAsP/InP квантово-размерных гетероструктур с раздельным ограничением, выращенных методом гидридной эпитаксии из металлоорганических соединений.

В работе [15] нами были продемонстрированы свойства мощных многомодовых длинноволновых ($\lambda = 1.7\text{--}1.8\ \mu\text{m}$) лазерных диодов. Для реализации одномодового режима генерации потребовалось провести работу по оптимизации структуры и конструкции лазерного диода. Исследуемая гетероструктура состояла из следующих эпитаксиальных слоев: сильнолегированные эмиттеры $N\text{-InP}$ ($N = 6 \cdot 10^{17}\ \text{cm}^{-3}$) и $P\text{-InP}$ ($P = 7.8 \cdot 10^{17}\ \text{cm}^{-3}$) (в качестве донорной и акцепторной примесей использовались кремний и цинк соответственно), преднамеренно не легированный волновод на основе твердого раствора InGaAsP толщиной $0.6\ \mu\text{m}$. Активная область была образована двумя напряженными InGaAsP квантовыми ямами толщиной по $76\ \text{Å}$ каждая, между ямами располагался промежуточный волноводный слой, выполненный на основе твердого раствора InGaAsP толщиной $195\ \text{Å}$.

В качестве базовой была выбрана мезаполосковая конструкция лазерного диода [12]. Одномодовый режим генерации в такой конструкции достигается за счет скачка эффективного показателя преломления в плоскости, параллельной $p\text{--}n$ -переходу Δn_L . Как было нами показано [16], существует множество факторов, влияющих на величину Δn_L . Наиболее важными из них являются свободные носители заряда и температура. Сложность учета данных факторов заключается в том, что концентрации свободных носителей заряда в волноводе и в активной области, а также температуры слоев изменяются с током накачки.

Для достижения максимальной мощности излучения лазерного диода в одномодовом режиме генерации на базе модели пассивного волновода [17] был проведен расчет параметров используемой конструкции. Определялись значения глубины травления и ширины полоски при заданных величинах параметров слоев выращенной гетероструктуры. Для остановки селективного травления структуры, при формировании мезаполоски требуемой глубины, в $P\text{-InP}$ в эмиттере выращивался InGaAsP стоп-слой толщиной $70\ \text{Å}$. Используя стандартную методику

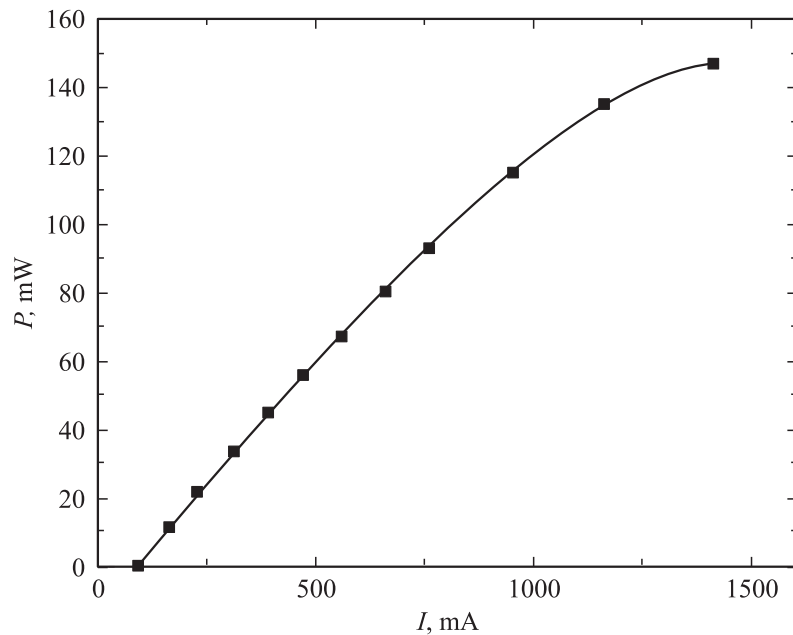


Рис. 1. Ватт-амперная характеристика в непрерывном режиме генерации при температуре теплоотвода 20°C для лазерного диода с длиной резонатора $L = 2000\ \mu\text{m}$, шириной полоска $W = 4.5\ \mu\text{m}$, высокоотражающим (95%) и низкоотражающим (5%) покрытием на гранях резонатора.

постростовых операций [12,16], и на основании проведенных расчетов из описанной выше структуры были изготовлены гетеролазеры мезаполосковой конструкции с шириной полоска $W = 4.5\ \mu\text{m}$ и различной длиной Фабри–Перо резонатора $L = 200\text{--}2000\ \mu\text{m}$. Полученные диоды напаивались полоском вниз с помощью индиевого припоя на медные теплоотводы.

Для всех изготовленных приборов проводились измерения ватт-амперных характеристик в непрерывном режиме генерации при температуре теплоотвода 20°C . Результаты измерений позволили определить величины внутреннего квантового выхода стимулированного излучения и внутренних оптических потерь, которые составили $\eta_i = 55\%$ и $\alpha_i = 10\ \text{cm}^{-1}$ соответственно. На рис. 1 приведена характерная

зависимость мощности излучения от тока накачки для лазерных диодов с длиной резонатора $L = 2000 \mu\text{m}$ и нанесенными на грани резонатора просветляющими и отражающими диэлектрическими покрытиями с коэффициентами отражения по мощности 5 и 95% соответственно. Максимальная выходная мощность для таких лазерных диодов достигала 150 mW и была ограничена разогревом активной области.

Повышение температуры активной области ведет к ухудшению излучательных характеристик лазерных диодов [11], и одна из причин такого рода поведения — это рост пороговой концентрации носителей заряда в квантовой яме [18]. В первую очередь, увеличение концентрации отражается на величине порогового тока. Чтобы охарактеризовать температурную чувствительность порогового тока, проводились измерения ватт-амперных характеристик в импульсном режиме при различных температурах теплоотвода. Экспоненциальная аппроксимация полученных экспериментально зависимостей порогового тока (I_{th}) от температуры (T) в диапазоне 10 – 70°С в соответствии с эмпирическим выражением

$$I_{th}(T) = I_{th}(300 \text{ K}) \cdot \exp(T - 300 \text{ K}/T_0)$$

дает значение характеристического параметра $T_0 = 50 \text{ K}$ для лазерных диодов с длиной резонатора 1000–2000 μm . Данная величина является наименьшей для лазерных диодов, выращенных в системе твердых растворов InGaAsP/InP в диапазоне длин волн 1.3–1.55 μm [12]. Вместе с этим лазерные диоды с $\lambda = 1.7\text{--}1.8 \mu\text{m}$ имеют большую глубину квантовой ямы, чем лазерные диоды с $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$. Приблизительная оценка увеличения глубины квантовой ямы для электронов при одной и той же ширине запрещенной зоны волновода дает величину 92 meV. Так, если для структуры с $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ и $E_{gw} = 1.23 \text{ eV}$ квантовая яма для электронов $E_{Qwe} = 91 \text{ meV}$ и $T_0 = 70 \text{ K}$ [12], то для исследуемой структуры с шириной запрещенной зоны эффективного волновода $E_{gw} = 1.23 \text{ eV}$ и соответственно с двукратным увеличением глубины квантовой ямы для электронов мы имеем $T_0 = 50 \text{ K}$. Одной из причин повышения температурной чувствительности может быть рост интенсивности процессов Оже-рекомбинации в активной области при увеличении длины волны генерации. Однако это не значит, что дальнейшее увеличение глубины квантовой ямы не сможет эффективно повлиять на улучшение температурной стабильности излучательных характеристик лазерных диодов [18,19]. Известно, что для лазерных

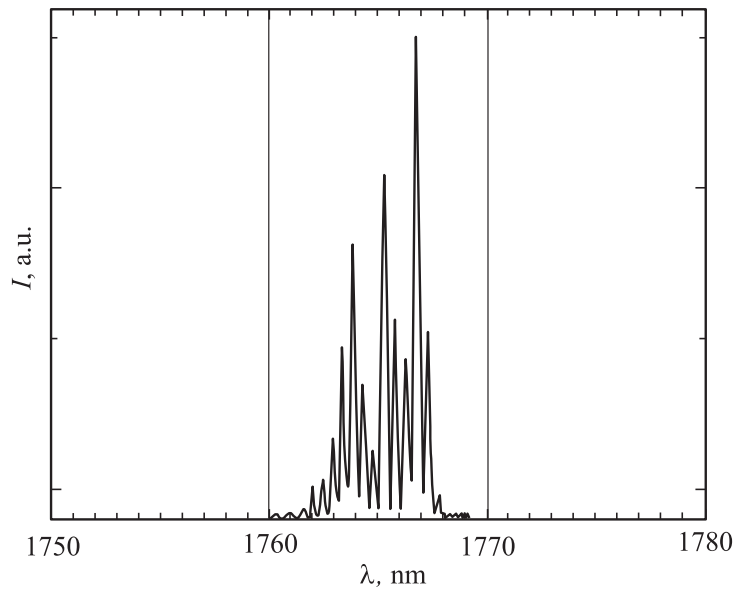


Рис. 2. Спектр излучения лазерного диода, работающего при токе, равном $1.5 \cdot I_{th}$, длина резонатора $L = 2000 \mu\text{m}$.

диодов, реализованных в системе твердых растворов AlInGaAsP/InP , позволяющей увеличить глубину квантовой ямы, дало увеличение характеристического параметра T_0 более чем в 1.5 раза [19,20] по сравнению с лазерными диодами, реализованными в классической системе твердых растворов InGaAsP/InP .

На рис. 2 представлен спектр одномодового лазерного диода, работающего в непрерывном режиме генерации на токе накачки, равном $1.5 \cdot I_{th}$. Расстояние между ближайшими модами в спектре соответствует расстоянию между нулевыми продольными модами Фабри–Перо резонатора. Это подтверждает тот факт, что лазерный диод работает на фундаментальной оптической моде.

На рис. 3 представлена зависимость пиковой длины волны генерации от тока накачки лазерного диода, работающего в непрерывном режиме генерации. Видно, что с повышением уровня инжекции происходит плавное смещение спектра излучения в длинноволновую область. Это

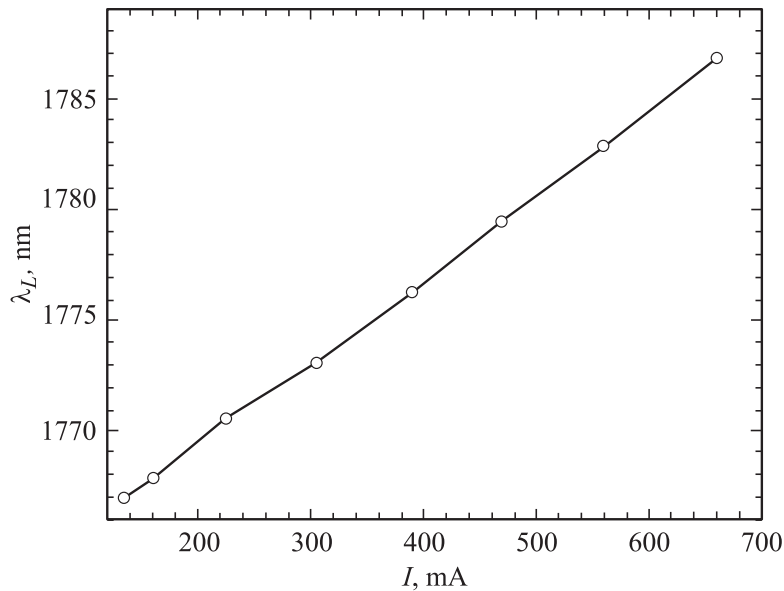


Рис. 3. Зависимость пиковой длины волны генерации от тока накачки лазерного диода, работающего в непрерывном режиме при температуре теплоотвода 20°C .

подтверждает факт разогрева активной области лазерного диода при непрерывной накачке.

Распределение интенсивности излучения лазерного диода в дальней зоне и в плоскости, параллельной p - n -переходу от тока накачки, показано на рис. 4. Видно, что ширина поля на уровне половины интенсивности сохраняется вплоть до токов накачки, равных $9 \cdot I_{th}$, что соответствует одному из критериев одномодового режима генерации. Дальнейшее увеличение тока накачки ведет к смещению картины дальнего поля (рис. 4), что, по нашему мнению, связано с эффектом смещения оптического луча (beam steering) [16]. Мощность, соответствующая максимальному току накачки лазерного диода, работающего в одномодовом непрерывном режиме генерации, достигала 100 mW, что является рекордным значением для одномодовых лазеров с длиной волны генерации $\lambda = 1.7\text{--}1.8 \mu\text{m}$ [7,8,21].

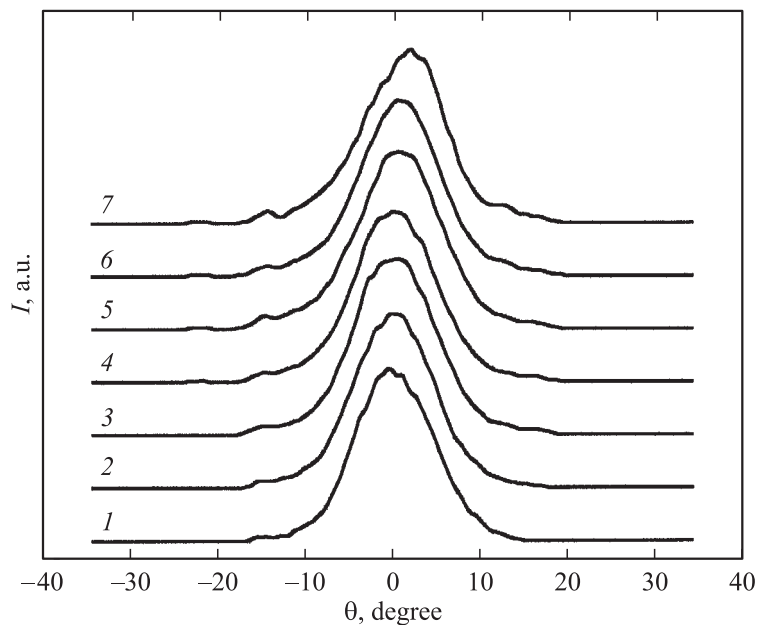


Рис. 4. Распределение интенсивности излучения в дальней зоне и в плоскости, параллельной p - n -переходу при различных значениях выходной оптической мощности для лазерного диода с длиной резонатора $L = 2000 \mu\text{m}$, работающего в непрерывном режиме, значение ширины поля на половине интенсивности ($\Theta_{||}$), degree: 1 — 10.5, 2 — 10.6, 3 — 10.9, 4 — 10.7, 5 — 11.1, 6 — 10.6; 7 — 10.1; мощность излучения в непрерывном режиме генерации, mW: 1 — 5, 2 — 20, 3 — 40, 4 — 60, 5 — 80, 6 — 100, 7 — 120.

Таким образом, методом МОС-гидридной эпитаксии были изготовлены квантово-размерные InGaAsP/InP гетероструктуры с отдельным ограничением. На базе выращенных гетероструктур были созданы мощные одномодовые лазерные диоды мезаполосковой конструкции с длиной волны генерации $\lambda = 1.7\text{--}1.8 \mu\text{m}$. Параметры конструкции лазерного диода были оптимизированы с целью сохранения одномодового режима генерации при максимальной выходной мощности. Продемонстрирована возможность сохранения одномодового режима генерации вплоть до 100 mW. Максимальная непрерывная мощность

излучения достигала 150 mW при комнатной температуре. Значение характеристического параметра T_0 для лазеров с длиной резонатора 1000–2000 μm составило 50 К.

Авторы благодарят Н.Ф. Кадошук, Т.А. Налет, Т.Н. Дрокину и Н.А. Рудову за помощь в подготовке образцов лазерных диодов.

Работа частично поддержана грантами межотраслевой научно-технической программы России „Физика твердотельных наноструктур“ РФФИ.

Список литературы

- [1] Wang J.-S., Lin H.-H., Sung L.-W. // IEEE J. Quant. Elect. 1998. QE-34. P. 1959.
- [2] Dong J., Ubukata A., Matsumoto K. // Japan. J. Appl. Phys. 1997. V. 36. P. 5468.
- [3] Mitsuhashi M., Ogasawara M., Oishi M., Sugira H., Kasaya K. // IEEE Photonics Technol. Lett. 1999. V. 11. P. 33.
- [4] Choi H.K., Turner G.W., Eglash S.I. // IEEE Photonics Technol. Lett. 1994. V. 6. P. 7.
- [5] Garbuzov D.Z., Lee H., Khalifin V., Martinelli R., Connolly J.C., Belenky G.L. // IEEE Photonics Technol. Lett. 1999. V. 11. P. 794.
- [6] Martinelli R.U., Zamerowski T.J., Longeway P.A. // Appl. Phys. Lett. 1989. V. 54. P. 277.
- [7] Martinelli R.U., Menna R.J., Triano A., Harvey M.G., Olsen G.H. // Electronics Lett. 1994. V. 30. P. 324.
- [8] Major J.S., Nam D.W., Osinski J.S., Welch D.F. // IEEE Photonics Technol. Lett. 1993. V. 5. P. 733.
- [9] Kondow M., Uomi K., Kitatani T., Watahiki S., Yazawa Y. // J. Cryst Growth. 1996. V. 164. P. 175.
- [10] Naoi H., Naoi Y., Sakai // Solid-State Electron. 1997. V. 41. P. 319.
- [11] Голикова Е.Г., Курешов В.А., Лешко А.Ю., Лютецкий А.В., Пихтин Н.А., Рябоштан Ю.А., Скрынников Г.А., Тарасов И.С., Алфёров Ж.И. // ФТП. 2000. Т. 34. С. 886.
- [12] Голикова Е.Г., Горбылев В.А., Ильин Ю.В., Курешов В.А., Лешко А.Ю., Лютецкий А.В., Пихтин Н.А., Рябоштан Ю.А., Симаков В.А., Тарасов И.С., Третьяков Е.А., Фетисова Н.В. // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26 (7). С. 57.
- [13] Голикова Е.Г., Горбылев В.А., Давидюк Н.Ю., Курешов В.А., Лешко А.Ю., Лютецкий А.В., Пихтин Н.А., Рябоштан Ю.А., Симаков В.А., Тарасов И.С., Фетисова Н.В. // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26 (6). С. 5.
- [14] Ливиц Д.А., Егоров А.Ю., Кочнев И.В., Капитонов В.А., Лантратов В.М., Леденцов Н.Н., Налет Т.А., Тарасов И.С. // ФТП. 2001. Т. 35. С. 380.

- [15] Голикова Е.Г., Курешов В.А., Лешко А.Ю., Лютецкий А.В., Пихтин Н.А., Рябоштан Ю.А., Слипченко С.О., Соколова З.Н., Фетисова Н.Ф., Бондарев А.Д., Тарасов И.С. // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28 (3). С. 66.
- [16] Лешко А.Ю., Лютецкий А.В., Пихтин Н.А., Слипченко С.О., Соколова З.Н., Фетисова Н.В., Голикова Е.Г., Рябоштан Ю.А., Тарасов И.С. // ФТП. 2002. Т. 36. С. 1393.
- [17] *Chuang S.L.* Physics of Optoelectronic Devices. New York: John Wiley & Sons, 1995.
- [18] Зегря Г.Г., Пихтин Н.А., Скрынников Г.В., Слипченко С.О., Тарасов И.С. // ФТП. 2001. Т. 35. С. 1001.
- [19] Слипченко С.О., Лютецкий А.В., Пихтин Н.А., Фетисова Н.В., Лешко А.Ю., Рябоштан Ю.А., Голикова Е.Г., Тарасов И.С. // ПЖТФ. 2003. Т. 29 (3). С. 65.
- [20] *Kuang G.K., Bohm G., Graf N., Rosel G., Meyer R., Ammann M.-C.* // IEEE Photonics Technol. Lett. 2001. V. 13. P. 275.
- [21] *Ochiai M., Temkin H., Forouhar S., Logan R.A.* // IEEE Photonics Technol. Lett. 1995. V. 7. P. 825.