

06

Мощные одномодовые лазерные диоды на основе квантово-размерных AlInGaAs/InP гетероструктур ($\lambda = 1.1\text{--}1.2\ \mu\text{m}$)

© А.В. Мурашова, Н.А. Пихтин, Н.В. Фетисова, А.В. Лютецкий,
Л.С. Вавилова, В.В. Васильева, А.А. Мармалюк,
Ю.А. Рябоштан, И.С. Тарасов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
Сигм Плюс, Москва
E-mail: a.murashova@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 23 ноября 2007 г.

Методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений выращены квантово-размерные AlInGaAs/InP лазерные гетероструктуры, излучающие на длине волны $1.18\ \mu\text{m}$. Достигнута выходная непрерывная мощность излучения $40\ \text{mW}$ при одномодовом режиме работы лазерного диода с шириной мезаполоска $W = 4\ \mu\text{m}$. Максимальная непрерывная мощность излучения составила $75\ \text{mW}$.

PACS: 42.55.Px, 42.70.Hj

Как известно, одним из наиболее широких применений одномодовых лазерных диодов является их использование в системах для накачки волоконных усилителей, твердотельных и волоконных лазеров. В последнее десятилетие наблюдается крайне интенсивное развитие мощных волоконных лазеров, что, в свою очередь, приводит к новым задачам в области разработок источников накачки и других сопутствующих компонентов.

В частности, недавно были разработаны висмутовые волоконные лазеры [1–5], которые генерируют излучение в области $1.1\text{--}1.3\ \mu\text{m}$ и являются весьма перспективными для получения эффективной генерации в желтом диапазоне длин волн ($575\text{--}589\ \text{nm}$) за счет удвоения частоты. Диапазон длин волн $575\text{--}580\ \text{nm}$ широко востребован в медицине — дерматологии и офтальмологии. Одночастотные мощные

лазеры с длиной волны излучения 589 nm необходимы в астрономии для коррекции адаптивной оптики.

Однако висмутовые волоконные лазеры нуждаются в одночастотном задающем лазере, в качестве которого может быть использован полупроводниковый одномодовый лазер, состыкованный с внешней волоконной решеткой на заданную длину волны. Требуемый диапазон длин волн 1.15–1.18 μm является крайне неудобным для создания полупроводниковых инжекционных квантово-размерных лазеров, поскольку находится на стыке освоенных диапазонов с применением подложек GaAs и InP. При использовании подложек GaAs лазерная гетероструктура должна иметь в качестве активной области сильно напряженную квантовую яму или квантовые точки InGaAs [6–8]. Получение гетероструктур с такими активными слоями является сложной технологической задачей. При использовании подложек InP и классической системы твердых растворов InGaAsP лазерная гетероструктура имеет недостаточные потенциальные барьеры между слоями для того, чтобы обеспечить непрерывную работу полупроводникового лазера при комнатной температуре. Исследования показали, что сильная зависимость выходных характеристик лазеров на основе системы InGaAsP/InP от температуры связана, в частности, с плохим электронным ограничением, так как только 1/3 часть от общей разницы между запрещенными зонами активной области и волновода приходится на зону проводимости [9–16].

В качестве альтернативы классической системе твердых растворов InGaAsP/InP может быть использована система AlInGaAs/InP. Ее преимущество состоит в том, что 2/3 общего энергетического скачка ширины запрещенной зоны между широкозонным и узкозонным полупроводником приходится на зону проводимости [17,18]. Кроме того, в данной системе существует область изопериодических с InP твердых растворов, запрещенная зона которых больше запрещенной зоны InP ($E_g = 1.351 \text{ eV}$). Эти характеристики системы AlInGaAs/InP успешно используются при разработке дизайна лазерных гетероструктур, с тем чтобы увеличить глубину потенциальной ямы для электронов и уменьшить температурную зависимость выходных характеристик лазерных диодов, как было показано в работе [19] при создании низкопороговых лазеров с длиной волны излучения 1.26 μm .

В связи с вышесказанным в настоящей работе исследовалась возможность создания мощных одномодовых лазеров на основе квантово-

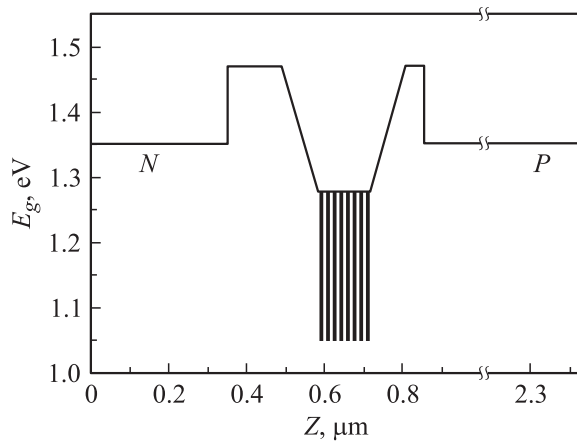


Рис. 1. Схематическая энергетическая зонная диаграмма квантово-размерной лазерной гетероструктуры в системе AlInGaAs/InP.

размерных AlInGaAs/InP гетероструктур, излучающих в диапазоне длин волн 1.1–1.2 μm .

Лазерные гетероструктуры были выращены методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений и состояли из сильнолегированных эмиттеров, роль которых играли слои n -InP толщиной 0.35 μm и p -InP толщиной 1.51 μm , широкозонных $\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$ ($E_g = 1.47 \text{ eV}$) барьеров, градиентного (GRIN) AlInGaAs волновода общей толщиной 0.32 μm и 8-ми AlInGaAs квантовых ям толщиной 50 \AA каждая, разделенных AlInGaAs ($E_g = 1.28 \text{ eV}$) барьерными слоями толщиной 120 \AA (рис. 1). В качестве контактного слоя в данной гетероструктуре использовался четверной твердый раствор InGaAsP ($E_g = 0.9 \text{ eV}$) толщиной 0.22 μm . Донорной примесью служил Si, акцепторной — Zn. Концентрация легирующей примеси в InP эмиттерах составляла $5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, в контактном слое — 10^{19} cm^{-3} . В верхнем p -InP эмиттере выращивался стоп-слой InGaAsP толщиной 110 \AA , который служил для остановки химического травления гетероструктуры при изготовлении мезаполосковой конструкции лазерного диода.

При выборе параметров мезаполосковой конструкции лазерного диода — ширины мезаполоска (W) и глубины травления (Δh), обеспечи-

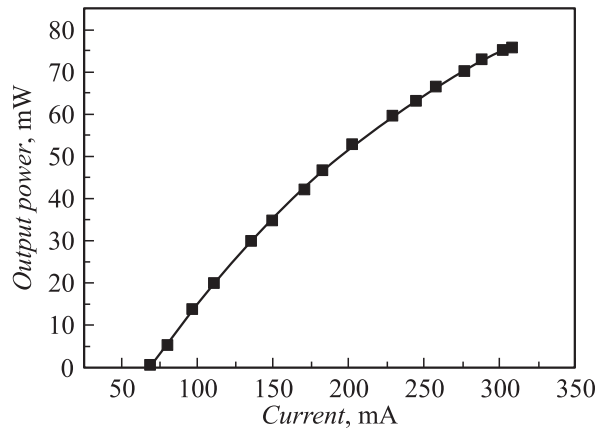


Рис. 2. Ватт-амперная характеристика в непрерывном режиме генерации.

вающих одномодовый режим работы, использовался подход, подробно описанный в нашей предыдущей статье [20]. В результате проведенных исследований были выбраны ширина мезаполоска $W = 4 \mu\text{m}$ и глубина травления $\Delta h = 1.43 \mu\text{m}$.

Основные параметры, характеризующие выращенные гетероструктуры, — пороговая плотность тока (J_{th}), внутренний квантовый выход (η_i), внутренние оптические потери (α_i) — измерялись на серии естественно сколотых образцов разной длины, которые напаивались на медные теплоотводы с помощью индиевого припоя. Для лазерной гетероструктуры AlInGaAs/InP с длиной волны излучения $1.18 \mu\text{m}$ пороговая плотность тока при бесконечной длине резонатора составила 1.23 kA/cm^2 , значения внутреннего квантового выхода и внутренних оптических потерь составили 37% и 14 cm^{-1} . Следует отметить, что данные параметры для аналогичной AlInGaAs/InP гетероструктуры с шестью квантовыми ямами, излучающей на длине волны $1.26 \mu\text{m}$, были следующие: $J_{th} = 700 \text{ A/cm}^2$, $\alpha_i = 13 \text{ cm}^{-1}$ [19]. Более высокое значение пороговой плотности тока для AlInGaAs/InP гетероструктуры с $\lambda = 1.18 \mu\text{m}$ обусловлено более мелкой квантовой ямой, что приводит к увеличению термического выброса свободных носителей заряда из активной области в волноводные слои. Более слабое ограничение

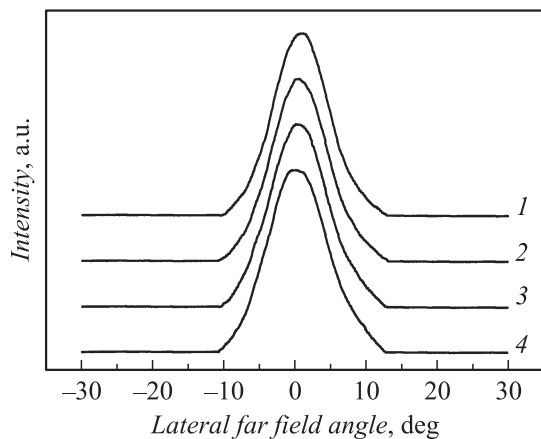


Рис. 3. Распределение интенсивности излучения в дальней зоне в плоскости, параллельной p - n -переходу, при различных значениях выходной оптической мощности для лазерного диода, ватт-амперная характеристика которого приведена на рис. 2. Значение ширины поля на половине интенсивности ($\Theta_{||}$), deg: 1 — 9, 2 — 9.3, 3 — 9.5, 4 — 10.1; мощность излучения в непрерывном режиме генерации, mW: 1 — 14, 2 — 20, 3 — 30, 4 — 40.

электронов в активном слое приводит и к уменьшению характеристической температуры T_0 , которая у лазерных диодов с $\lambda = 1.18 \mu\text{m}$ лежит в диапазоне 70–80 К, а у лазерных диодов с $\lambda = 1.26 \mu\text{m}$ — в диапазоне 90–110 К для температурного интервала 0–70°С. Приведенные результаты иллюстрируют те трудности, с которыми приходится сталкиваться при создании полупроводниковых лазеров, излучающих в области 1.1–1.2 μm .

На рис. 2 изображена типичная ватт-амперная характеристика при непрерывном режиме накачки лазерного диода ($\lambda = 1.18 \mu\text{m}$) с длиной резонатора $L = 770 \mu\text{m}$ и с нанесенными на грани резонатора отражающими ($R > 95\%$) Si/SiO₂ и просветляющими ($R < 5\%$) SiO₂ покрытиями. Максимальная выходная мощность была ограничена насыщением ватт-амперной характеристики и составила 75 mW. Для однододового режима генерации было достигнуто значение выходной мощности 40 mW. При уменьшении длины резонатора до 360 μm эти значения мощностей уменьшались в два раза.

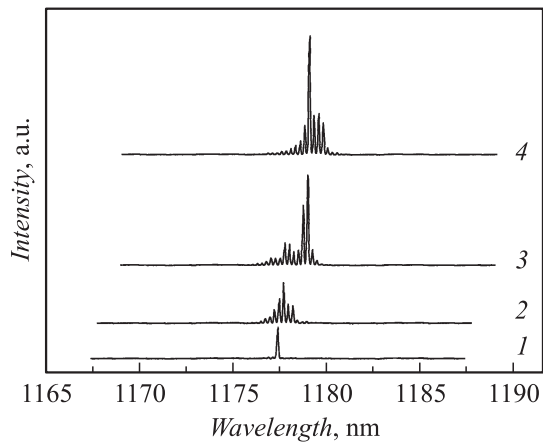


Рис. 4. Спектр излучения лазерного диода, ватт-амперная характеристика которого приведена на рис. 2, при разных значениях тока накачки I , mA: 1 — 85, 2 — 110, 3 — 135, 4 — 165.

Проведенные измерения картины дальнего поля лазерных диодов показали устойчивую генерацию в нулевой моде в плоскости, перпендикулярной p – n -переходу, с шириной на половине интенсивности 30° . Для плоскости, параллельной p – n -переходу, во всем диапазоне рабочих токов дальнее поле сохраняло симметричную форму относительно нормали к центру выходного зеркала лазерного диода. Значение ширины диаграммы направленности излучения на половине интенсивности ($\Theta_{||}$) слегка увеличивается от 9° (вблизи порога генерации) до 10° (выходная мощность 40 mW) (рис. 3). Такое стабильное поведение диаграммы направленности подтверждает одномодовый характер излучения лазерного диода в указанном диапазоне значений выходной мощности. На рис. 4 показан типичный спектр излучения лазерного диода, который также подтверждает одномодовый режим работы, поскольку содержит пики, соответствующие только нулевой моде с соответствующим длине резонатора межмодовым расстоянием.

Таким образом, в настоящей работе показана возможность создания одномодовых лазерных диодов, излучающих в диапазоне длин волн 1.1–1.2 μm , с использованием системы твердых растворов

AlInGaAs/InP. Несмотря на довольно высокие значения внутренних оптических потерь в таких лазерных гетероструктурах ($\alpha_i = 14 \text{ cm}^{-1}$), удалось достичь значений выходной непрерывной мощности излучения 40 mW при однододовом режиме работы лазерного диода с шириной мезаполоска $W = 4 \mu\text{m}$. Максимальная непрерывная мощность излучения составила 75 mW.

Работа была выполнена при поддержке Программы президиума РАН (П-2) „Фемтосекундная оптика и новые оптические материалы“.

Список литературы

- [1] *Fujimoto Y., Nakatsuka M.* // Jpn. J. Appl. Phys. 2001. V. 40. Part 2. N 3B. P. L279.
- [2] *Dvoyrin V.V., Mashinsky V.M., Bulatov L.I., Bufetov I.A., Shubin A.V., Melkumov M.A., Kustov E.F., Dianov E.M., Umnikov A.A., Khopin V.F., Yashkov M.V., Guryanov A.N.* // Opt. Lett. 2006. V. 31. N 20. P. 2966.
- [3] *Razdobreev I., Bigot L., Pureur V., Favre A., Bouwmans G., Douay M.* // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 90. P. 031103.
- [4] *Dianov E.M., Dvoyrin V.V., Mashinsky V.M., Umnikov A.A., Yashkov M.V., Guryanov A.N.* // Quantum Elect. 2005. V. 35. N 12. P. 1083.
- [5] *Rulkov A.B., Ferin A.A., Popov S.V., Taylor J.R., Razdobreev I., Bigot L., Bouwmans G.* // Optics Express. 2007. V. 15. N 9. P. 5473.
- [6] *Sharma T.K., Zorn M., Bugge F., Hülsewede R., Erbert G., Weyers M.* // IEEE Photon. Technol. Lett. 2002. V. 14. N 7. P. 887.
- [7] *Erbert G., Bugge F., Fricke J., Ressel P., Staske R., Sumpf B., Wenzel H., Weyers M., Tränkle G.* // IEEE J. of Sel. Top. in Quant. Electron. 2005. V. 11. N 5. P. 1217.
- [8] *Михрин С.С., Жуков А.Е., Ковш А.Р., Малеев Н.А., Васильев А.П., Семенова Е.С., Устинов В.М., Кулагина М.М., Никитина Е.В., Сошников И.П., Шерняков Ю.М., Лившиц Д.А., Крыжановская Н.В., Сизов Д.С., Максимов М.В., Цацульников А.Ф., Леденцов Н.Н., Vimberg D., Алфёров Ж.И.* // ФТП. 2002. Т. 36. В. 11. С. 1400.
- [9] *Temkin H., Coblenz D., Logan R.A., Van der Zeil J.P., Tanbun-Ek T., Yadvish R.D., Sergent A.M.* // Appl. Phys. Lett. 1993. V. 62. P. 2402.
- [10] *Bernussi A.A., Temkin H., Coblenz D.L., Logan R.A.* // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 66. P. 67.
- [11] *Seki S., Oohasi H., Sugiura H., Hirono T., Yokoyama K.* // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 67. P. 1054.

- [12] *Зегря Г.Г., Пихтин Н.А., Скрынников Г.В., Слипченко С.О., Тарасов И.С.* // ФТП. 2001. Т. 35. С. 1001.
- [13] *Belenky G.L., Donetsky D.V., Reynolds C.L., Kazarinov R.F., Shtengel G.E., Luryi S., Lopata J.* // IEEE Photonics Technol. Lett. 1997. V. 9. P. 1558.
- [14] *Asryan L.V., Gunko N.A., Polkovnikov A.S., Zegrya G.G., Suris R.A., Lau P.K., Makino T.* // Semicond. Sci. Technol. 2000. V. 15. P. 1131.
- [15] *Adachi S.* Physical Properties of III–V Semiconductor Compounds. John Wiley & Sons Inc., 1992.
- [16] *Лешко А.Ю., Лютецкий А.В., Пихтин Н.А., Скрынников Г.В., Соколова З.Н., Тарасов И.С., Фетисова Н.В.* // ФТП. 2000. Т. 34. С. 1457.
- [17] *Sugiyama Y., Inata T., Fujii T., Nakata Y., Muto S., Hiyamizu S.* // Japan. J. Appl. Phys. 1986. V. 30. P. L648.
- [18] *Vurgaftman I., Meyer J.R., Ram-Mohan L.R.* // J. Appl. Phys. 2001. V. 89. P. 5815.
- [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.* // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 3. С. 65.
- [20] *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. В. 11. С. 1393.