

Непрерывные мощные лазерные линейки спектрального диапазона 750–790 нм

Н.С.Дегтярева, С.А.Кондаков, Г.Т.Микаелян, П.В.Горлачук, М.А.Ладугин, А.А.Мармалюк, Ю.Л.Рябоштан, И.В.Яроцкая

Разработана эффективная конструкция полупроводниковой гетероструктуры, позволяющая изготовить непрерывные линейки лазерных диодов спектрального диапазона 750–790 нм. Определены оптимальные технологические режимы получения гетероструктур GaAsP/AlGaInP/GaAs методом МОС-гидридной эпитаксии. Показано, что использование квантовых ям с точно заданной величиной рассогласования позволяет снизить пороговую плотность тока и увеличить внешнюю дифференциальную эффективность. Приведены результаты исследований характеристик линеек лазерных диодов, изготовленных из указанных гетероструктур.

Ключевые слова: линейка лазерных диодов, МОС-гидридная эпитаксия, напряженная квантовая яма.

1. Введение

Создание мощных лазерных линеек квазинепрерывно-го и особенно непрерывного режимов работы по-прежнему является одной из сложных и актуальных задач квантовой электроники. Наибольший интерес и вместе с тем основные трудности вызывает изготовление линеек лазерных диодов (ЛЛД) спектрального диапазона 750–790 нм. Мощные линейки данного спектрального диапазона находят применение во многих областях науки и техники, среди которых фотодинамическая терапия, высокоразрешающая печать, накачка различных активных сред лазеров, технологическая обработка материалов и др. [1].

Для этих задач традиционно используются полупроводниковые гетероструктуры в системе AlAs–GaAs. Множество достоинств и технологическая простота изготовления гетероструктур AlGaAs/GaAs позволяют создавать надежные лазерные диоды с низкой и средней выходными мощностями. К сожалению, выходные характеристики мощных лазерных диодов на их основе, если не применять специальные дорогостоящие технологические процедуры при изготовлении активных элементов и обработке поверхностей зеркальных граней лазерного кристалла, подвержены быстрой деградации. Она может быть обусловлена наличием вредных примесных атомов (например, кислорода) на поверхности грани и в глубине полупроводника, являющихся фактически центрами безызлучательной рекомбинации, что приводит к снижению внутреннего квантового выхода, падению выходной мощности и перегреву активной области. Причем влияние кислорода особенно заметно в случае структур с длиной

волны излучения менее 780 нм [2]. Преждевременную катastroфическую деградацию зеркал можно избежать, применяя различные технологии очистки и пассивации зеркал [3, 4], используя блокирующие и ненакачиваемые током области [5], а также вводя технологию перемешивания квантовых ям (КЯ) вблизи зеркал [6, 7].

Без применения этих подходов увеличить срок службы работы лазерных диодов или линеек лазерных диодов, работающих в рассматриваемом спектральном диапазоне, можно, используя для роста гетероструктур не содержащие алюминий системы материалов, такие, например, как GaAsP/AlGaInP/GaAs [8, 9].

Несмотря на некоторые особенности указанной системы материалов (разупорядочение твердых растворов, наличие областей несмешиваемости для InGaAsP, различие в резкостях гетерограниц InGaP/(Ga,In)AsP и (Ga,In)AsP/InGaP, наличие напряжений в КЯ, трудности формирования протяженных слоев и др.), создание на их основе мощных и высоконадежных ЛЛД является на сегодняшний день весьма актуальной и перспективной задачей. Развитие технологии создания мощных полупроводниковых излучателей позволит как обеспечить высокие излучательные характеристики лазерных диодов и линеек, так и увеличить срок их службы. В связи с этим нашей целью была разработка, изготовление и исследование мощных непрерывных ЛЛД, работающих в диапазоне 750–790 нм, на основе гетероструктур, не содержащих алюминий в активной и волноводной областях.

2. Методы получения и изготовления гетероструктур GaAsP/AlGaInP/GaAs

Лазерные гетероструктуры были выращены в системе материалов GaAsP/AlGaInP/GaAs методом МОС-гидридной эпитаксии на установке СИГМОС-130. Для подавления эффектов разупорядочения тройных и четверных твердых растворов в качестве подложек использовались пластины GaAs <100>, разориентированные на 10° в направлении <111А>. Положительные стороны использования таких подложек широко отражены в литературе [10]. Для устранения разупорядочения и обеспечения макси-

Н.С.Дегтярева, С.А.Кондаков, Г.Т.Микаелян. ОАО «НПП Инжекст», Россия, 410052 Саратов, просп. 50 лет Октября, 101; e-mail: Nataliya12345@mail.ru, kondakov.rabota@yandex.ru
П.В.Горлачук, М.А.Ладугин, А.А.Мармалюк, Ю.Л.Рябоштан, И.В.Яроцкая. ООО «Сигм плюс», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3; e-mail: maximladugin@mail.ru, almarm@mail.ru

Поступила в редакцию 12 февраля 2013 г., после доработки – 27 марта 2013 г.

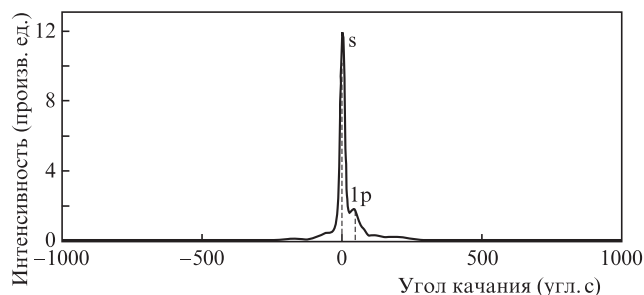


Рис.1. Кривая качания выращенной лазерной гетероструктуры GaAsP/AlGaInP/GaAs (s – подложка GaAs, lp – слой AlGaInP).

мального сигнала фотолюминесценции температура роста подбиралась в диапазоне 600–700 °С. Источниками элементов третьей группы были триметилалюминий, триэтилгаллий и триметилиндий, пятой группы – 100%-ный арсин и фосфин. В качестве источников для легирующих материалов n- и p-типов использовались смесь силана с водородом и диэтилцинк соответственно. Давление в ростовой камере при протекании газа-носителя и всех исходных реагентов поддерживалось в диапазоне 30–70 Тор, что обеспечивало наилучшую резкость гетерограниц.

Исследования гетероструктур методом рентгеновской дифрактометрии на установке «Vektor» продемонстрировало хорошее согласование волноводных и эмиттерных слоев с подложкой (рис.1). Данное обстоятельство, кроме уменьшения напряженностей в слоях гетероструктуры, имеет особое значение при монтаже ЛЛД на теплоотвод. Существенным при этом является достижение минимального искривления линеек, что позволяет монтировать их на теплоотвод практически без искривлений (т.е. со «смайлом» менее 0.5 мкм) [11, 12]. Радиус кривизны таких гетероструктур составил 40–50 м, что много лучше радиусов, характерных для традиционных «идеально» согласованных гетероструктур на основе AlGaAs/GaAs (10–15 м).

Подбор состава активной области лазерных гетероструктур позволял выбирать необходимую длину волны электролюминесценции в диапазоне 750–770 нм.

Для изучения выходных характеристик из полученных эпитаксиальных гетероструктур были изготовлены ЛЛД с ширинами контакта диодов $w = 150$ и 200 мкм и шагом 500 и 400 мкм соответственно при длине резонатора $L = 1500$ мкм. Коэффициенты отражения переднего (R_1) и заднего (R_2) зеркал резонатора с нанесенными диэлектрическими покрытиями выбирались в диапазоне $R_1 = 0.03$ – 0.15 и $R_2 = 0.95$ – 0.98 . Кристаллы ЛЛД протяженностью $E = 5$ и 10 мм состояли из 12 и 24 лазерных диодов соответственно. После монтажа указанных кристаллов на теплоотвод проводились измерения и испытания в режиме непрерывного тока накачки.

3. Результаты и выводы

Для достижения улучшенных приборных характеристик была разработана и изготовлена лазерная гетероструктура GaAsP/AlGaInP/GaAs с узким волноводом ($d = 0.2$ – 0.3 мкм). В серии проведенных исследований было установлено, что использование широких волноводов ($d = 1.0$ – 1.5 мкм), несмотря на более низкие оптические потери и сниженную нагрузку на зеркальную грань, не является целесообразным при создании ЛЛД с низким поро-

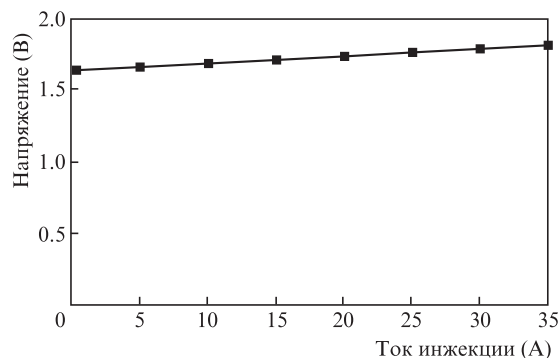


Рис.2. Типичная вольт-амперная характеристика ЛЛД.

вым током и высокой дифференциальной эффективностью [13]. В отличие от хорошо зарекомендовавшей себя в ряде применений концепции широких волноводов [8, 14], мы пошли по пути уменьшения порогового тока, электрического и теплового сопротивления. Снижение оптических потерь достигалось за счет профильного легирования – распределения примеси в p- и n-эмиттерах в непосредственной близости от гетерограницы с волноводом [15].

Реализация этих мер позволила получить невысокие значения напряжения отсечки и последовательного сопротивления: на пороге генерации лазера напряжение отсечки равнялось 1.5–1.6 В (рис.2), дифференциальное сопротивление – 5 мОм.

Основное внимание уделялось качеству создаваемой квантоворазмерной активной области, что было обусловлено известными трудностями, возникающими при формировании резких гетерограниц InGaP/(Ga,In)AsP вследствие обменного взаимодействия атомов As/P, а также сегрегации и задержки индия, характерных для всех типов эпитаксиальных реакторов.

Целесообразность использования напряженных КЯ при создании полупроводниковых лазеров неоднократно обсуждалась в литературе [16, 17]. Было показано, что наличие упругих напряжений в КЯ улучшает выходные характеристики с точки зрения как повышения мощности излучения, так и увеличения срока службы. Введение упругих напряжений приводит к деформации зонной диаграммы и смещению относительно друг друга изначально вырожденных подзон легких и тяжелых дырок с одновременным уменьшением плотности состояний в валентной зоне. Оба эти фактора позволяют уменьшить времена излучательной рекомбинации, увеличить оптическое усиление и снизить необходимую для начала лазерной генерации плотность инжектированных носителей. Сопутствующей особенностью использования напряженных слоев является доминирование ТМ или ТЕ поляризованного излучения в результате основного вклада в общее усиление подзоны легких или тяжелых дырок [16].

На рис.3 представлены ватт-амперные характеристики ЛЛД, изготовленных на основе гетероструктур с ненапряженной и средненапряженной КЯ (рассогласование 0.6%–0.8%). Следует отметить, что ЛЛД на основе традиционно используемой системы материалов AlGaAs/GaAs демонстрировали более ранний загиб ватт-амперной характеристики.

Из рис.3 видно, что использование напряженных КЯ позволяет снижать пороговую плотность тока на 20%–30% при сохранении внешней дифференциальной эффективности или даже ее увеличении на 5%–10%.

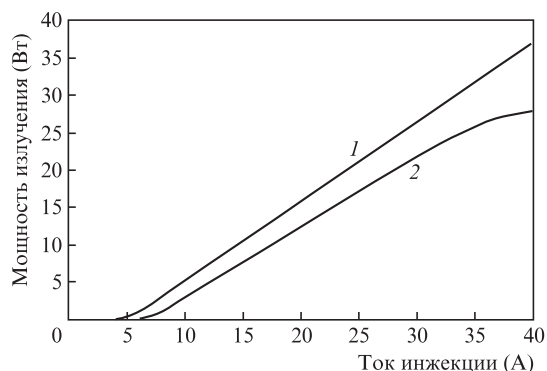


Рис.3. Ватт-амперные характеристики двух ЛЛД протяженностью 5 мм с ненапряженной (1) и со средненапряженной (2) КЯ. Дифференциальные эффективности обоих ЛЛД составляют 0.9–0.95 и 1.0–1.05 Вт/А соответственно.

Этот факт объясняется положительным влиянием напряжений на эффективность электронно-дырочной рекомбинации, материальное усиление и плотность тока прозрачности. Аналогичные тенденции описаны в работе [17] на примере использования КЯ сжатия или растяжения InGaAsP и InGaAlAs.

На рис.4 приведены типичные спектральные характеристики ЛЛД на основе системы GaAsP/AlGaInP/GaAs в собственном и внешнем резонаторах.

На рис.4,а приведено спектральное распределение излучения ЛЛД протяженностью $E = 5$ мм. Видно, что излучение полностью находится в пределах требуемого спектрального интервала (менее 5 нм), и это свидетельствует

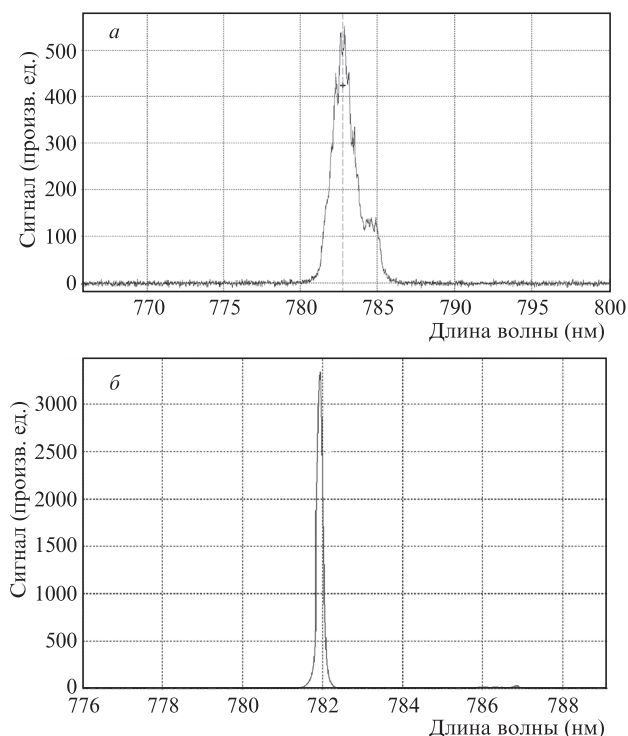


Рис.4. Спектры излучения ЛЛД в собственном резонаторе (а) и во внешнем резонаторе с селективно отражающим зеркалом (б).

как о достаточно хорошей однородности гетероструктуры, так и о качественном монтаже ЛЛД на теплоотвод.

На рис.4,б показан спектр ЛЛД во внешнем миниатюрном резонаторе. Выходным зеркалом резонатора является селективно отражающая голографическая решетка. Вторым зеркалом резонатора служит естественная грань лазерного кристалла с нанесенным диэлектрическим зеркалом ($R_2 \approx 98\%$). Для подавления генерации собственного резонатора выходная грань лазерного кристалла просветлена. Все излучение находится в спектральном интервале менее 0.5 нм.

Таким образом, в работе продемонстрировано, что благодаря наличию требуемого уровня упругих напряжений в КЯ, хорошей теплопроводности и меньшей скорости поверхностной рекомбинации для системы материалов (In,Ga)AsP/(Al,Ga)InP/GaAs, ЛЛД, изготовленные на их основе, обеспечивают сохранение линейности ватт-амперные характеристики до выходной мощности 30 Вт (для линеек с $E = 5$ мм) и 60 Вт (для линеек с $E = 10$ мм) в непрерывном режиме работы и демонстрируют надежную работу в течение длительного времени (тысячи часов).

- Solarz R.W., Emanuel M.A., Skidmore J.A., Freitas B.L., Krupke W.F. *Laser Phys.*, **8** (3), 737 (1998).
- Knauer A., Wenzel H., Erbert G., Sumpf B., Weyers M. *J. Electron. Mater.*, **30**, 1421 (2001).
- Ressel P., Erbert G., Zeimer U., Hausler K., Beister G., Sumpf B., Klehr A., Trankle G. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **17** (5), 962 (2005).
- Lambert R., Ayling T., Hendry A., Carson J., Barrow D., McHendry S., Scott C., McKee A., Meredith W. *J. Lightwave Technol.*, **24**, 956 (2006).
- Rinner F., Rogg J., Kelemen M.T., Mikulla M., Weimann G., Tomm J.W., Thamm E., Poprawe R. *J. Appl. Phys.*, **93** (3), 1848 (2003).
- Walker C.L., Bryce A.C., Marsh J.H. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **14** (10), 13946 (2002).
- Qiu B.C., Kowalski O., McDougall S.D., Liu X.F., Marsh J.H. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6909**, 69090S1 (2008).
- Безотосный В.В., Васильева В.В., Винокуров Д.А., Капитонов В.А., Крохин О.Н., Лешко А.Ю., Лютецкий А.В., Мурашева А.В., Налет Т.А., Николаев Д.Н., Пихтин Н.А., Попов Ю.М., Слипченко С.О., Станкевич А.Л., Фетисова Н.В., Шамахов В.В., Тарасов И.С. *ФТП*, **42** (3), 357 (2008).
- Wang Y., Yang Y., Qin L., Wang C., Yao D., Liu Y., Wang L. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7135**, 71350N (2008).
- Stringfellow G.B. *Organometallic Vapor-phase Epitaxy: Theory and Practice* (San Diego: Acad. Press, 1999).
- Liu X., Zhao W. *Proc. IEEE Electronic Components and Technology Conf.* (San Diego, 2009, pp. 2106–2113).
- Мармалюк А.А., Ладугин М.А., Яроцкая И.В., Панарин В.А., Микаелян Г.Т. *Квантовая электроника*, **42**, 15 (2012).
- Мармалюк А.А., Ладугин М.А., Андреев А.А., Телегин К.Ю., Яроцкая И.В., Мешков А.С., Коняев В.П., Сапожников С.М., Лебедева Е.И., Симаков В.А. *Квантовая электроника*, **43** (2013) (в печати).
- Bugge F., Knauer A., Gramlich S., Rechenderg I., Beister G., Sebastian J., Wenzel H., Erbert G., Weyers M. *J. Electron. Mater.*, **29** (1), 57 (2000).
- Акчурин Р.Х., Андреев А.Ю., Булаев П.В., Залевский И.Д., Мармалюк А.А., Никитин Д.Б., Падалица А.А. *Неорганические материалы*, **40** (8), 787 (2004).
- Levy M., Berk Y., Karni Y. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6104**, 61040B1 (2006).