

Мощные импульсные лазерные диоды спектрального диапазона 1.5–1.6 мкм

П.В.Горлачук, Ю.Л.Рябоштан, М.А.Ладугин, А.А.Падалица, А.А.Мармалюк, В.Д.Курносков, К.В.Курносков, О.В.Журавлева, В.И.Романцевич, Р.В.Чернов, А.В.Иванов, В.А.Симаков

Рассмотрены вопросы повышения выходной импульсной мощности лазерных диодов спектрального диапазона 1.5–1.6 мкм на основе гетероструктур InGaAs/AlGaInAs/InP, полученных методом МОС-гидридной эпитаксии. Показано, что использование некоторых вариаций параметров волноводного слоя может обеспечить повышение квантовой эффективности и снижение внутренних оптических потерь. Приведены результаты исследования лазерных диодов на основе предложенных гетероструктур.

Ключевые слова: МОС-гидридная эпитаксия, лазерный диод, спектральный диапазон 1.5–1.6 мкм.

1. Введение

Получение высокой мощности излучения лазерных диодов (ЛД) спектрального диапазона 1.5–1.6 мкм зависит от геометрии применяемых гетероструктур (ГС) и является сложной задачей. Широко используемая в данной ИК области система материалов InGaAsP–InP имеет сравнительно небольшой барьер для электронов в квантовой яме (КЯ), что определяет невысокую характеристическую температуру для приборов на основе ГС этой системы [1, 2]. В результате ЛД, изготовленные из ГС данного типа, характеризуются повышенной чувствительностью к рабочей температуре, а значит, демонстрируют при больших токах накачки снижение наклона ватт-амперной характеристики (ВтАХ).

ГС AlGaInAs/InP обеспечивают лучшее электронное ограничение, чем ГС InGaAsP, что существенно для мощных ЛД и подтверждается более высокими достигнутыми характеристическими температурами для ЛД на основе ГС AlGaInAs/InP [3, 4]. Помимо выбора материала ГС, определяющее влияние на уровень выходных характеристик имеет геометрия активной области лазерной ГС, в частности ширина волноводного слоя и глубина КЯ. В работах [5, 6–10] показаны преимущества приборов на основе ГС с расширенным волноводом перед структурами с узким волноводом. Применение ГС с широким волноводом позволяет использовать активные элементы большей длины, что обеспечивает получение более высокой мощности излучения благодаря снижению потерь.

Во многих работах рассмотрено влияние ширины запрещенной зоны волноводного слоя на выходные параме-

тры приборов [11, 12]. Повышение электронного ограничения определяет как удержание электронов в КЯ, препятствуя их выбросу в волноводный слой, так и степень влияния различных механизмов безызлучательной рекомбинации. Вклад оже-рекомбинации в насыщение ватт-амперных характеристик является значительным фактором, снижающим эффективность работы длинноволновых ЛД [13]. По этой причине величина электронного ограничения носителей заряда в КЯ, определяемая шириной запрещенной зоны волновода, оказывает непосредственное влияние на выходные характеристики приборов, полученных на основе ГС AlGaInAs/InP. По аналогии с коротковолновыми приборами [14] предполагается, что повышение ширины запрещенной зоны волноводного слоя при неизменном составе КЯ уменьшит влияние безызлучательной рекомбинации и выброса электронов из КЯ и, тем самым, позволит повысить квантовую эффективность при больших токах накачки.

Настоящая работа посвящена решению задачи получения высокой импульсной мощности излучения ЛД на основе двойных ГС раздельного ограничения AlGaInAs/InP. Рассмотрено влияние ширины волноводного слоя и величины электронного ограничения в КЯ на выходные параметры ЛД спектрального диапазона 1.5–1.6 мкм.

2. Эксперимент

Эпитаксиальные ГС InGaAs/AlGaInAs/InP для лазерных излучателей выращивались методом МОС-гидридной эпитаксии в горизонтальном щелевом реакторе при пониженном давлении. Рост осуществлялся в атмосфере водорода на подложках InP с ориентацией (001). Оптимизация основных ростовых параметров (температура, давление и скорость осаждения) проводилась для достижения высоких характеристик материала.

Исследованные образцы представляли собой двойные ГС раздельного ограничения с квантоворазмерной активной областью. Волноводные слои ограничивались эмиттерными слоями InP, профильно легированными кремнием и цинком; основные параметры волноводного слоя приведены в табл. 1

П.В.Горлачук, Ю.Л.Рябоштан, М.А.Ладугин, А.А.Падалица, А.А.Мармалюк, В.Д.Курносков, К.В.Курносков, О.В.Журавлева, В.И.Романцевич, Р.В.Чернов, А.В.Иванов, В.А.Симаков. ОАО «НИИ «Полос» им. М.Ф.Стельмаха», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3, корп. 1; e-mail: gorlachuk@bk.ru, yu.ryaboshtan@siplus.ru, maximladugin@mail.ru, A.Padalitsa@siplus.ru, al-marm@mail.ru, mail@dilas.ru

Поступила в редакцию 17 июля 2013 г., после доработки – 26 июля 2013 г.

Табл.1. Основные параметры ГС InGaAs/AlGaInAs/InP.

Номер образца	Толщина волновода (мкм)	Ширина запрещенной зоны волновода (эВ)
1	0.3	1.0
2	1.5	1.0
3	1.5	1.12

Из полученных ГС изготавливались одиночные ЛД с шириной мезаполоскового контакта 100 мкм и различной длиной резонатора. Образцы ЛД монтировались на медный теплоотвод эпитаксиальной стороной вниз. Измерения импульсных выходных характеристик приборов проводились на ЛД со скотч-лентами зеркалами и с нанесенными покрытиями с коэффициентами отражения 95% и 5%. Мощностные характеристики исследовались при комнатной температуре, длительности импульсов 100 нс и частоте их следования 5 кГц.

3. Обсуждение результатов

Способ снижения внутренних оптических потерь за счет расширенного волновода хорошо зарекомендовал себя при создании ЛД повышенной мощности в диапазонах 0.8–1.1 и 1.7–1.8 мкм [8, 10, 15–17]. Этот же подход был использован при создании мощных ЛД, излучающих в диапазоне 1.5–1.6 мкм. Были изготовлены ГС трех типов с различной геометрией активной области (табл.1) и исследованы ЛД на их основе.

На рис.1 приведены ВтАХ указанных ЛД. Характеристика образца 1 с узким волноводом имела ранний загиб; увеличение тока накачки свыше 15 А приводило лишь к

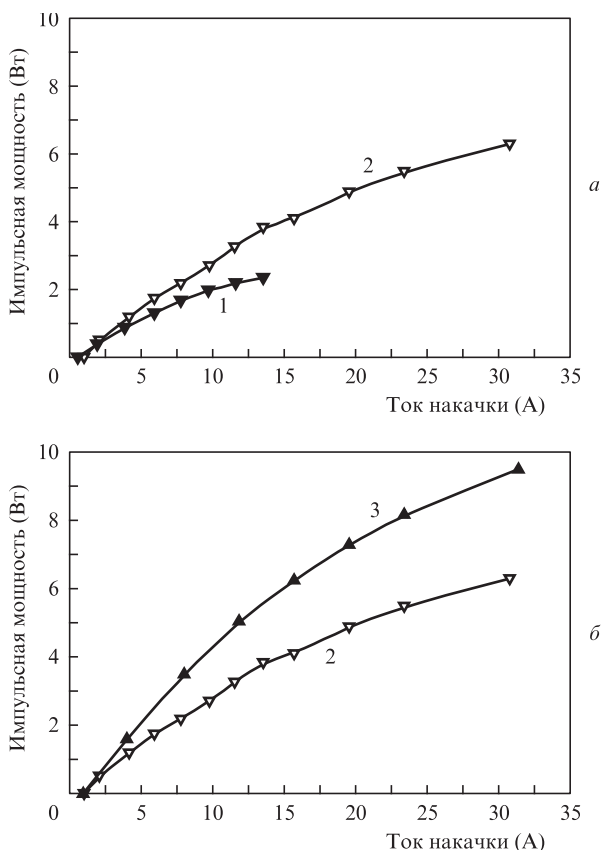


Рис.1. Ватт-амперные характеристики образцов ЛД (1–3) на основе ГС AlGaInAs/InP.

ее насыщению при мощности ~ 2.2 Вт. Расширение волновода позволило увеличить наклон ВтАХ. Лазерный образец 2 благодаря более низким оптическим потерям достиг более высокой мощности при увеличенной длине резонатора. Однако при расширении волноводного слоя возможна генерация дополнительных мод. Во избежание этого квантоворазмерная активная область смещалась в сторону р-эмиттера, что снижало фактор усиления для мод высокого порядка [8, 15]. Применение расширенного волновода позволило повысить импульсную мощность излучения в ~ 1.5 раза (до ~ 4 Вт при токе накачки 13 А) по сравнению с образцом 1 (рис.1,а). В интервале токов накачки 13–30 А образец 2 показывал устойчивый рост мощности, достигшей 6 Вт при токе 30 А.

Лазеры, изготовленные из ГС с различной шириной запрещенной зоны E_g волноводного слоя (образцы 2 и 3, табл.1), сравнивались с целью определения влияния электронного ограничения в КЯ на выходные характеристики. Ожидалось, что увеличение ширины запрещенной зоны волноводного слоя увеличит электронное ограничение в КЯ и тем самым повлияет на внутреннюю квантовую эффективность ЛД. Исходя из достаточности электронного ограничения носителей в КЯ и оптического ограничения со стороны InP, было определено, что оптимальная ширина запрещенной зоны волновода составляет 1.12 эВ. Однако использование AlGaInAs с высоким содержанием Al вызывает нежелательное внедрение остаточного кислорода из технологической среды при эпитаксиальном росте, что накладывает ограничения на повышение высоты барьера КЯ [18]. Так, использование волноводного слоя AlGaInAs с $E_g = 1.24$ эВ не позволило получить надежных приборов. Такие ЛД быстро деградировали, поэтому их характеристики не были рассмотрены в настоящей работе.

Сопоставление ВтАХ образцов 2 и 3 (рис.1,б) показывает, что более высокий наклон характеристики имеют ЛД, изготовленные из ГС с увеличенной шириной запрещенной зоны волновода и, соответственно, с повышенным барьером для электронов в КЯ. При токе 30 А лазерный диод на основе ГС с расширенным волноводом с шириной запрещенной зоны 1.12 эВ (образец 3) имел мощность излучения 9.5 Вт. Дальнейшее увеличение тока накачки приводило к насыщению мощности.

Таким образом, показано, что оптимизация геометрии волноводного слоя ГС InGaAs/AlGaInAs/InP оказывает сильное влияние на характеристики ЛД, излучающих в спектральном диапазоне 1.5–1.6 мкм. Наибольшая импульсная оптическая мощность продемонстрирована образцами с расширенным волноводом и увеличенной шириной запрещенной зоны. Выходная импульсная мощность образца 3 превысила в 3–4 раза мощность образца 1 на основе ГС традиционной конструкции.

В работе исследованы способы повышения мощности лазерных излучателей спектрального диапазона 1.5–1.6 мкм путем оптимизации геометрии и условий роста волноводных слоев ГС. Изготовленные на основе ГС с расширенным волноводным слоем ЛД продемонстрировали большую квантовую эффективность. При этом в результате снижения внутренних оптических потерь пиковая импульсная мощность достигла ~ 6 Вт, тогда как мощность излучения лазеров на основе ГС стандартной геометрии составляла ~ 2 Вт. Увеличение E_g волновода и оптимизация ростовых параметров позволили за счет повышения электронного

ограничения дополнительно увеличить мощность излучения до 9.5 Вт.

1. Adachi S. *Properties of Semiconductor Alloys: Group-IV, III-V and II-VI Semiconductors* (Chichester: Wiley & Sons, 2009).
2. Mircea A., Ougazzaden A., Primot G., Kazmierski C. *J. Cryst. Growth*, **124** (1–4), 737 (1992).
3. Слипченко С.О., Лютецкий А.В., Пихтин Н.А., Фетисова Н.В., Лешко А.Ю., Рябоштан Ю.Л., Голикова Е.Г., Тарасов И.С. *Письма в ЖТФ*, **29** (3), 65 (2003).
4. Ohnoki N., Okazaki G., Koyama F., Iga K. *Electron. Lett.*, **35** (1), 51 (1999).
5. Булаев П.В., Капитонов В.А., Лютецкий А.В., Мармалюк А.А., Никитин Д.Б., Николаев Д.Н., Падалица А.А., Пихтин Н.А., Бондарев А.Д., Залевский И.Д., Тарасов И.С. *ФТП*, **36** (9), 1144 (2002).
6. Al-Muhanna A., Mawst L.J., Botez D., Garbuzov D.Z., Martinelli R.U., Connolly J.C. *Appl. Phys. Lett.*, **73**, 1182 (1998).
7. Слипченко С.О., Пихтин Н.А., Фетисова Н.В., Хомылев М.А., Мармалюк А.А., Никитин Д.Б., Падалица А.А., Булаев П.В., Залевский И.Д., Тарасов И.С. *Письма в ЖТФ*, **29** (23), 26 (2003).
8. Слипченко С.О., Винокуров Д.А., Пихтин Н.А., Соколова З.Н., Станкевич А.Л., Тарасов И.С., Алферов Ж.И. *ФТП*, **38** (12), 1477 (2004).
9. Винокуров Д.А., Васильева В.В., Капитонов В.А., Лютецкий А.В., Николаев Д.Н., Пихтин Н.А., Слипченко С.О., Станкевич А.Л., Шамахов В.В., Фетисова Н.В., Тарасов И.С. *ФТП*, **44** (2), 246 (2010).
10. Шашкин И.С., Винокуров Д.А., Лютецкий А.В., Николаев Д.Н., Пихтин Н.А., Растегаева М.Г., Соколова З.Н., Слипченко С.О., Станкевич А.Л., Шамахов В.В., Веселов Д.А., Бондарев А.Д., Тарасов И.С. *ФТП*, **46** (9), 1234 (2012).
11. Пихтин Н.А., Слипченко С.О., Шашкин И.С., Ладугин М.А., Мармалюк А.А., Подоскин А.А., Тарасов И.С. *ФТП*, **44**, 1411 (2010).
12. Лютецкий А.В., Борщев К.С., Пихтин Н.А., Слипченко С.О., Соколова З.Н., Тарасов И.С. *ФТП*, **42** (1), 106 (2008).
13. Скрынников Г.В., Зегря Г.Г., Пихтин Н.А., Слипченко С.О., Шамахов В.В., Тарасов И.С. *ФТП*, **37** (2), 243 (2003).
14. Ладугин М.А., Лютецкий А.В., Мармалюк А.А., Падалица А.А., Пихтин Н.А., Подоскин А.А., Рудова Н.А., Слипченко С.О., Шашкин И.С., Бондарев А.Д., Тарасов И.С. *ФТП*, **44** (10), 1417 (2010).
15. Винокуров Д.А., Зорина С.А., Капитонов В.А., Мурашова А.В., Николаев Д.Н., Станкевич А.Л., Хомылев М.А., Шамахов В.В., Лешко А.Ю., Лютецкий А.В., Налет Т.А., Пихтин Н.А., Слипченко С.О., Соколова З.Н., Фетисова Н.В., Тарасов И.С. *ФТП*, **39** (3), 388 (2005).
16. Лютецкий А.В., Борщев К.С., Бондарев А.Д., Налет Т.А., Пихтин Н.А., Слипченко С.О., Фетисова Н.В., Хомылев М.А., Мармалюк А.А., Рябоштан Ю.Л., Симаков В.А., Тарасов И.С. *ФТП*, **41** (7), 883 (2007).
17. Лютецкий А.В., Пихтин Н.А., Фетисова Н.В., Лешко А.Ю., Слипченко С.О., Соколова З.Н., Рябоштан Ю.Л., Мармалюк А.А., Тарасов И.С. *ФТП*, **43** (12), 1646 (2009).
18. Praseuth J.P., Quillec M., Gerard J.M. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **866**, 36 (1987).