

ЛАЗЕРЫ

Полупроводниковые AlGaInAs/InP-лазеры со сверхузкими волноводами

А.А.Мармалюк, Ю.Л.Рябоштан, П.В.Горлачук, М.А.Ладугин, А.А.Падалица, С.О.Слипченко, А.В.Лютецкий, Д.А.Веселов, Н.А.Пихтин

Созданы лазерные диоды на основе гетероструктур AlGaInAs/InP со сверхузким волноводом. Показано, что применение такого волновода при использовании профильного легирования обеспечивает баланс между внутренними оптическими потерями и тепловым сопротивлением. Лазерные диоды с полосковым контактом шириной 100 мкм продемонстрировали при комнатной температуре выходную оптическую мощность свыше 4 Вт в непрерывном и свыше 20 Вт в импульсном режиме работы.

Ключевые слова: гетероструктура AlGaInAs/InP, МОС-гидридная эпитаксия, лазерный диод, безопасная для глаз область спектра.

1. Введение

Для многих практических применений в последнее время все более актуальными становятся полупроводниковые излучатели с повышенной выходной оптической мощностью. В частности, отчетливо наметилась тенденция перехода от лазерных устройств ближнего ИК диапазона к лазерам, работающим в условно безопасной для глаз области с длинами волн излучения, превышающими 1.4 мкм. Не остались в стороне и полупроводниковые лазеры, предназначенные для работы в системах, допускающих контакт глаза человека с излучением. В этой связи представляет значительный интерес поиск путей повышения выходной мощности полупроводниковых лазеров, генерирующих в области длин волн 1.5–1.6 мкм. Для решения этой задачи хорошо зарекомендовал себя подход с использованием гетероструктур с расширенными волноводами для снижения внутренних оптических потерь. Так, продемонстрировано повышение выходной мощности лазерными диодами (ЛД) на основе указанных гетероструктур, излучающими на длинах волн 800–850 нм [1, 2], 940–1060 нм [3, 4] и в рассматриваемом диапазоне 1500–1600 нм [5, 6]. Вместе с тем, в ряде работ показано, что в приборах со значительным тепловыделением получают преимущества лазеры с узким волноводом, который способствует снижению последовательного и теплового сопротивлений, играющих ключевую роль в таких излучателях. Действенность такого подхода продемонстрирована при создании лазерных диодов с длиной волны излучения 800–900 нм [7, 8].

А.А.Мармалюк. ООО «Сигм плюс», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3, корп. 1; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31; e-mail: almarm@mail.ru

Ю.Л.Рябоштан, П.В.Горлачук, М.А.Ладугин, А.А.Падалица. ООО «Сигм плюс», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3, корп. 1; e-mail: yu.ryaboshstan@splus.ru, gorlachuk@bk.ru

С.О.Слипченко, А.В.Лютецкий, Д.А.Веселов, Н.А.Пихтин. Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Россия, 194021 С.-Петербург, ул. Политехническая, 26; e-mail: SergHPL@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 30 января 2017 г.

Настоящая работа посвящена исследованию перспектив использования гетероструктур с узкими волноводами для создания мощных лазерных излучателей спектрального диапазона 1500–1600 нм, для которых характерны меньший КПД и более низкие значения характеристической температуры, а следовательно, и более сильная зависимость выходных характеристик от температуры активной области.

2. Эксперимент

Лазерные квантоворазмерные гетероструктуры раздельного ограничения AlGaInAs/InP формировались методом МОС-гидридной эпитаксии. Ширина волновода варьировалась в пределах 0.05–0.2 мкм. Активная область состояла из двух упруго компенсированных квантовых ям InGaAs. Зонная диаграмма гетероструктуры схематически изображена на рис.1. Из полученных гетероструктур изготавливались ЛД с полосковым контактом шириной 100 мкм и длиной резонатора 1000–3000 мкм. На

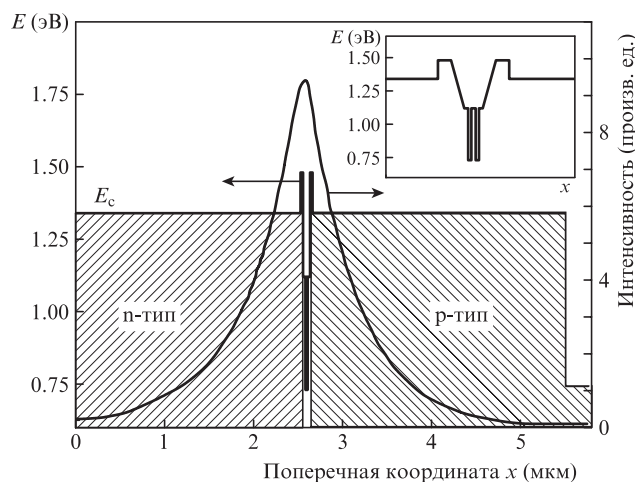


Рис.1. Схематическое изображение зонной диаграммы лазерной гетероструктуры со сверхузким волноводом и распределения интенсивности электромагнитного поля для нулевой моды. Легированные области выделены штриховкой. На вставке – участок зонной диаграммы в увеличенном масштабе.

границы резонатора наносились просветляющие и отражающие покрытия с коэффициентами отражения $R_1 \approx 0.05$ и $R_2 \approx 0.95$. ЛД монтировались на медном теплоотводе и их выходные характеристики изучались в импульсном режиме (длительность импульсов 100 нс, частота следования 1 кГц) и непрерывном режиме работы при температуре теплоотвода 25°C.

3. Обсуждение результатов

Анализируя полупроводниковые материалы (GaInAsP, AlGaInAs, InP), пригодные для создания ЛД рассматриваемого спектрального диапазона (1.5–1.6 мкм), легко видеть, что теплопроводность InP (0.65–0.7 Вт/(см·К)) существенно превышает теплопроводность используемых твердых растворов GaInAsP и AlGaInAs (0.04–0.1 Вт/(см·К)) [9]. Отсюда следует вывод о том, что максимальное сужение волновода будет обеспечивать лучший отвод тепла от активной области и способствовать повышению выходной мощности. При использовании узкого волновода значительная часть электромагнитного излучения распространяется по легированным эмиттерным слоям (см. рис.1), что обуславливает повышенный уровень внутренних оптических потерь. Применяя профильное легирование, можно снизить связанные с этим потери.

Активная область в исследованных гетероструктурах состояла из двух квантовых ям InGaAs, фактор оптического ограничения которых был приблизительно равным фактору оптического ограничения, характерному для гетероструктур с расширенным волноводом [6]. Напряженные квантовые ямы широко применяются для снижения безызлучательной оже-рекомбинации и межзонного поглощения носителей в валентной зоне. Рассогласование постоянных решеток ямы и барьера приводит к образованию биаксиальных напряжений в квантовой яме и, как следствие, к изменению зонной диаграммы гетероструктуры. В результате искажения и расщепления подзон валентной зоны уменьшается эффективная масса дырок и, таким образом, снижается плотность состояний в валентной зоне. Вследствие этого уменьшается поглощение между подзонами валентной зоны и уменьшается вероятность оже-рекомбинации [10, 11]. В настоящей работе использовались напряженные квантовые ямы с частичной компенсацией упругих напряжений в барьерах, имеющих напряжения противоположного знака. Такой подход позволяет обеспечить высокий уровень упругих напряжений в квантовых ямах без их релаксации с образованием дислокаций несоответствия.

Типичные излучательные характеристики ЛД в непрерывном и импульсном режимах генерации приведены на рис.2. Измерения проводились на полосковых лазерах с длиной резонатора 2.5 мм и шириной мезаполоскового контакта 100 мкм. Установлено, что ЛД на основе гетероструктур со сверхузкими волноводами при температуре теплоотвода 25°C позволяют достигнуть выходной мощности 4.0 Вт при непрерывном режиме работы и 20 Вт в режиме коротких импульсов.

Вместе с тем, вполне закономерно лишь незначительное повышение оптических потерь в рассматриваемых ЛД со сверхузкими волноводами ($3\text{--}4\text{ см}^{-1}$) по сравнению с потерями в ЛД с традиционными расширенными волноводами ($\sim 2\text{ см}^{-1}$) [12, 13], что достигается, в первую очередь, благодаря профильному легированию эмиттерных слоев InP. С другой стороны, выше упоминалось об

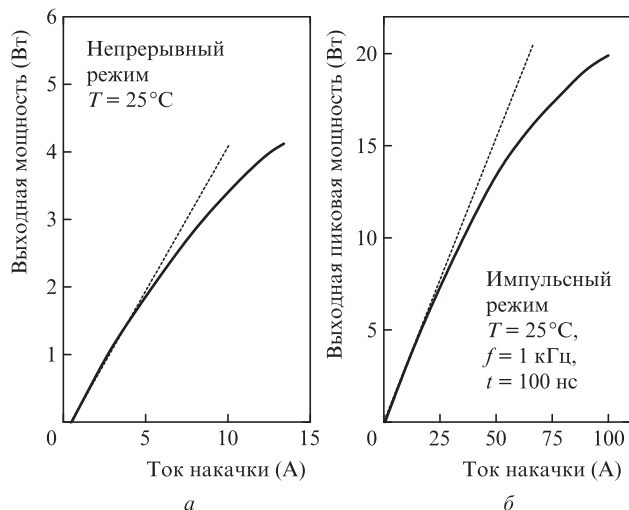


Рис.2. Ватт-амперные характеристики лазеров в непрерывном (а) и импульсном (б) режимах работы. Длина волны 1550–1565 нм.

улучшении условий отвода тепла от активной области по мере сужения волновода, что должно благоприятно сказываться на выходных характеристиках. Налицо два противоположно действующих фактора, роль которых во многом зависит от особенностей конструктивной реализации ЛД. В рассматриваемом случае в непрерывном режиме работы фактор понижения теплового сопротивления позволяет повысить предел насыщения выходной мощности.

Дополнительными факторами, способствующими реализации повышенной мощности в импульсном режиме таких ЛД, может служить снижение оптических потерь на свободных носителях заряда, заполняющих волновод при высоких уровнях накачки, и уменьшение связанных с ними токов утечки [12, 13]. Резкое сокращение ширины волновода существенно снижает концентрацию свободных носителей заряда в волноводных слоях, что может благоприятно сказываться на уровне максимально достижимой выходной мощности.

Спектральные характеристики ЛД при различных токах накачки в непрерывном режиме работы приведены на рис.3. При повышении тока накачки от порогового значения до тока $I \approx 5\text{ А}$ наблюдается сдвиг максимума длины волны генерации на 14–16 нм.

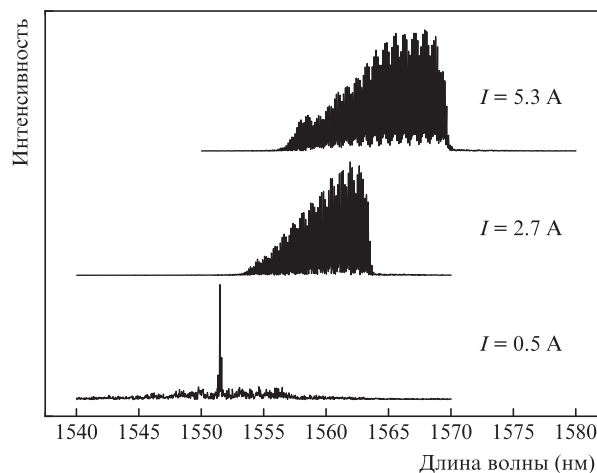


Рис.3. Спектральные характеристики ЛД в непрерывном режиме при различных токах накачки.

Гетероструктуры AlGaInAs/InP со сверхузкими волноводами продемонстрировали перспективность такой конструкции для создания мощных ЛД, излучающих на длинах волн 1.5–1.6 мкм. Особенности преимуществ созданных ЛД проявились при работе в режиме коротких импульсов. Представленные результаты получены в рамках работ по реализации концепции создания мощных лазерных излучателей на основе гетероструктур с узкими волноводами. По всей видимости, еще более существенных достижений в этом направлении можно ожидать при создании многоэлементных излучателей – решеток таких ЛД.

4. Заключение

В работе созданы гетероструктуры AlGaInAs/InP со сверхузкими волноводами и изготовлены лазерные диоды на их основе. Указанные приборы позволяют получить выходную мощность до 4 Вт в непрерывном режиме работы и до 20 Вт в режиме коротких импульсов. Показано, что улучшение условий отвода тепла от активной области лазерного диода способствует реализации более высокой выходной мощности в непрерывном режиме работы, несмотря на увеличение внутренних оптических потерь. Сужение волновода уменьшает оптические потери на носителях, заполняющих волновод при высоких уровнях накачки, и способствует достижению повышенной выходной мощности в импульсном режиме.

Работа выполнена при частичной поддержке Программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ.

1. Андреев А.Ю., Лешко А.Ю., Лютецкий А.В., Мармалюк А.А., Налет Т.А., Падалица А.А., Пихтин Н.А., Сабитов Д.Р., Симаков В.А., Слипенченко С.О., Хомылев М.А., Тарасов И.С. *ФТП*, **40**, 628 (2006).
2. Безотосный В.В., Васильева В.В., Винокуров Д.А., Капитонов В.А., Крохин О.Н., Лешко А.Ю., Лютецкий А.В., Мурашова А.В., Налет Т.А., Николаев Д.Н., Пихтин Н.А., Попов Ю.М., Слипенченко С.О., Станкевич А.Л., Фетисова Н.В., Шамахов В.В., Тарасов И.С. *ФТП*, **42**, 357 (2008).
3. 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**, 1144 (2002).
4. 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., Слипенченко С.О., Соколова З.Н., Фетисова Н.В., Тарасов И.С. *ФТП*, **39**, 388 (2005).
5. Голикова Е.Г., Курешов В.А., Лешко А.Ю., Лившиц Д.А., Лютецкий А.В., Николаев Д.Н., Пихтин Н.А., Рябоштан Ю.Л., Слипенченко С.О., Тарасов И.С., Фетисова Н.В. *Письма в ЖТФ*, **26**, 40 (2000).
6. Горлачук П.В., Рябоштан Ю.Л., Мармалюк А.А., Курносов В.Д., Курносов К.В., Журавлева О.В., Романцевич В.И., Чернов Р.В., Иванов А.В., Симаков В.А. *ФТП*, **48**, 1100 (2014).
7. Ладугин М.А., Коваль Ю.П., Мармалюк А.А., Петровский В.А., Багаев Т.А., Андреев А.Ю., Падалица А.А., Симаков В.А. *Квантовая электроника*, **43**, 407 (2013).
8. Мармалюк А.А., Андреев А.Ю., Коняев В.П., Ладугин М.А., Лебедева Е.И., Мешков А.С., Морозюк А.Н., Сапожников С.М., Данилов А.И., Симаков В.А., Телегин К.Ю., Яроцкая И.В. *ФТП*, **48**, 120 (2014).
9. Adachi S. *Properties of Semiconductor Alloys: Group-IV, III–V and II–VI Semiconductors* (Chichester: John Wiley & Sons, 2009).
10. Zah C.E., Bhat R., Pathak B.N., Favire F., Lin W., Wang M.C., Andreadakis N.C., Hwang D.M., Koza M.A., Lee T.P., Wang Z., Darby D., Flanders D., Hsieh J.J. *IEEE J. Quantum Electron.*, **30** (2), 511 (1994).
11. Kasukawa A., et al. *IEEE J. Quantum Electron.*, **29** (6), 1528 (1993).
12. Винокуров Д.А., Капитонов В.А., Лютецкий А.В., Пихтин Н.А., Слипенченко С.О., Соколова З.Н., Станкевич А.Л., Хомылев М.А., Шамахов В.В., Борщев К.С., Арсентьев И.Н., Тарасов И.С. *ФТП*, **41** (8), 1003 (2007).
13. Веселов Д.А., Шашкин И.С., Бахвалов К.В., Лютецкий А.В., Пихтин Н.А., Растегаева М.Г., Слипенченко С.О., Бечвай Е.А., Стрелец В.А., Шамахов В.В., Тарасов И.С. *ФТП*, **50** (9), 1247 (2016).