

Мощные импульсные лазерные диоды на основе тройных интегрированных гетероструктур InGaAs/AlGaAs/GaAs, излучающие на длине волны 0.9 мкм

Е.И.Давыдова, М.В.Зверков, В.П.Коняев, В.В.Кричевский, М.А.Ладугин, А.А.Мармалюк, А.А.Падалица, В.А.Симаков, А.В.Сухарев, М.Б.Успенский

Исследованы тройные вертикально-интегрированные лазеры на основе гетероструктуры InGaAs/AlGaAs/GaAs, выращенной методом МОС-гидридной эпитаксии в едином эпитаксиальном процессе. Типичный наклон ватт-амперной характеристики для тройного лазерного диода составил 2.6 Вт/А. Представленные частотные характеристики и температурные зависимости оптической мощности от тока накачки продемонстрировали хорошую однородность выращенных гетероструктур. Лазерные диоды, изготовленные на основе тройной лазерной гетероструктуры (ширина плоского контакта 200 мкм, длина резонатора 1 мм) и излучающие на длине волны 0.9 мкм, позволили достигнуть в импульсном режиме мощности излучения 80 Вт при токе инжекции 40 А.

Ключевые слова: интегрированные гетероструктуры, лазерный диод, МОС-гидридная эпитаксия

1. Введение

Благодаря развитию современных полупроводниковых эпитаксиальных технологий, таких как молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ) и МОС-гидридная эпитаксия (МОСГЭ), становится возможным выращивание большого количества эпитаксиальных слоев с высокой степенью контроля их толщины, уровня легирования и резкости гетерограниц. В результате за последние десятилетия в мире, в том числе и в нашей стране, создан целый ряд оптоэлектронных приборов и функциональных схем на основе сложных многослойных полупроводниковых наногетероструктур, позволяющих сочетать разнообразные физические явления и принципы. Это лазеры с вертикальным резонатором и поверхностным выводом излучения [1, 2], ИК фотоприемники на квантовых ямах [3, 4], униполярные и биполярные квантово-каскадные лазеры [5, 7], лазеры с волноводом на основе фотонного кристалла [8, 9] и т. п.

Достижение высокой яркости излучения, а также увеличение выходной оптической мощности и долговечности работы полупроводниковых лазерных диодов (ЛД) являются первостепенными задачами при их использовании в оптической связи, для управления и слежения за движением транспортных средств, при технологической обработке и накачке твердотельных лазеров и пр.

Предложено несколько способов увеличения выходной оптической мощности одиночного ЛД, среди которых можно выделить использование гетероструктур раздельного ограничения с широким и сверхшироким вол-

новодом [10], гетероструктур с асимметричным положением активной области [11], применение профильного легирования эмиттерных слоев [12], создание лазера с большим оптическим резонатором и др. [13].

Помимо указанных способов, дальнейшее повышение выходной мощности полупроводниковых излучателей может быть обеспечено путем сложения мощностей отдельных ЛД, например при помощи создания лазерных линеек – горизонтальных наборов ЛД (параллельный тип соединения) [14]. Однако в этом случае получение высоких выходных мощностей ограничивается возможностями источников накачки (источников питания).

Преодолеть данное ограничение можно путем изготовления вертикальных наборов ЛД (последовательный тип соединения). Однако стоит отметить, что при изготовлении подобного набора отдельных ЛД методом сборки возникают дополнительные контактные сопротивления между ЛД, ограничивающие быстродействие прибора и предельную частоту следования импульсов излучения. Одним из вариантов вертикального набора из отдельных ЛД, лишенного этих недостатков, является структура, в которой используются эпитаксиально-интегрированные ЛД, выращенные в одном технологическом процессе [15–17]. Основные преимущества прибора с несколькими активными областями – большая яркость излучения, определяемая количеством излучающих областей, а также отсутствие дополнительных контактных сопротивлений, существенно уменьшающих КПД и предельную частоту следования импульсов излучения.

Целью настоящей работы является исследование излучательных характеристик интегрированных лазерных гетероструктур для мощных импульсных ЛД, излучающих на длине волны $\lambda_g = 0.9$ мкм.

2. Эксперимент

Эпитаксиальные гетероструктуры для интегрированных лазерных диодов на основе InGaAs/GaAs/AlGaAs,

Е.И.Давыдова, М.В.Зверков, В.П.Коняев, В.В.Кричевский, М.А.Ладугин, А.А.Мармалюк, А.А.Падалица, В.А.Симаков, А.В.Сухарев, М.Б.Успенский. ФГУП «НИИ "Полнос" им. М.Ф.Степанаха», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3; e-mail: M.Ladugin@splus.ru

Поступила в редакцию 20 февраля 2009 г., после доработки – 21 мая 2009 г.

были выращены методом МОС-гидридной эпитаксии. Рост осуществлялся на подложках из GaAs ориентации (100) при пониженном давлении в кварцевом реакторе горизонтального типа на установке «СИГМОС-130» с вращающимся графитовым подложкодержателем. В качестве источников элементов третьей группы использовались ТЭГ ($\text{Ga}(\text{C}_2\text{H}_5)_3$), ТМА ($\text{Al}(\text{CH}_3)_3$) и ТМИ ($\text{In}(\text{CH}_3)_3$), источником пятой группы служил высокочистый (100%) арсин (AsH_3). Газом-носителем являлся водород, очищенный методом диффузии через нагретый до $T = 450^\circ\text{C}$ палладиевый фильтр, с точкой росы не выше -100°C .

В качестве легирующих примесей, пригодных для создания высокоэффективных туннельных контактов, были выбраны кремний и углерод. Данные примеси имеют низкие коэффициенты диффузии и малую энергию активации, у их исходных реагентов отсутствует «эффект памяти» и они хорошо подходят для выращивания эпитаксиальных структур высокого качества в условиях МОС-гидридной эпитаксии [18]. Источниками для них служили силан (SiH_4) и тетрахлорид углерода (CCl_4) соответственно.

Составы эмиттерных и волноводных слоев, а также толщина и состав активной области подбирались таким образом, чтобы обеспечить возможность получения узкой диаграммы направленности излучения в плоскости, перпендикулярной $p-n$ -переходу, на $\lambda = 0.9$ мкм. Толщины промежуточных слоев (туннельных контактов GaAs) выбирались равными 0.1 мкм, а уровень их легирования составлял $5 \times 10^{19} - 1 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$.

Для измерения мощностных характеристик были изготовлены лазеры с шириной полоскового контакта $w = 200$ мкм и длиной резонатора $L_{\text{cav}} = 1 - 1.6$ мм. Коэффициент отражения передней грани резонатора с нанесенным оптическим покрытием R_{front} составлял 0.03–0.05, а коэффициент отражения задней грани R_{rear} был не меньше 0.95.

3. Результаты и их обсуждение

Конструкция тройной эпитаксиально-интегрированной гетероструктуры для мощных импульсных лазерных излучателей показана на рис. 1.

В нашей работе [7] были получены мощные импульсные лазерные излучатели на основе двойных эпитаксиально-интегрированных гетероструктур, и показано, что для создания устройств с малым падением напряжения на среднем обратном смещенном $p-n$ -переходе требуется

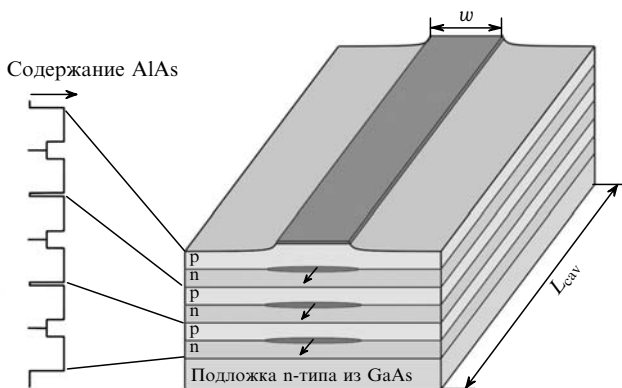


Рис. 1. Типичная геометрия лазерного элемента с тремя активными областями.

введение специального низкоомного туннельного перехода между двумя смежными ЛД. Для того чтобы падение напряжения на обратном смещенном $p-n$ -переходе не превышало 0.1 В, уровни легирования эпитаксиальных слоев туннельного контакта должны быть не меньше $10^{19} - 10^{20} \text{ см}^{-3}$.

Измерения характеристик лазеров на основе тройных интегрированных гетероструктур InGaAs/AlGaAs/GaAs (ЛД с тремя активными областями) проводились в импульсном режиме накачки. Длительность импульсов составляла 100 нс, а частота их следования изменялась в диапазоне 10–50 кГц.

Типичные напряжения отсечки прямой ветки вольт-амперной характеристики для одиночного ЛД составили 1.35–1.4 В, для двойного ЛД – 2.8–2.9 В и для тройного ЛД – 4.1–4.3 В (рис. 2, а), т. е. напряжение отсечки ЛД увеличивается пропорционально количеству последовательно выращенных лазерных диодов.

Измеренная полная ширина диаграммы направленности по уровню 0.5 от максимума в перпендикулярной (θ_{\perp}) и параллельной (θ_{\parallel}) $p-n$ -переходу плоскостях для одиночного ЛД составили 22° и 8° соответственно. Расходимость излучения изготовленных лазеров с двумя и тремя активными областями в плоскости, перпендикулярной активным слоям, была равна $20^\circ - 23^\circ$, что совпадает с расходимостью для ЛД с одним активным слоем. Следовательно, диаграмма направленности интегрированного лазерного излучателя определяется диаграммой направленности отдельного лазера.

Ватт-амперные характеристики (ВтАХ) одиночного, двойного и тройного лазерного излучателей на основе интегрированных гетероструктур InGaAs/AlGaAs/GaAs представлены на рис. 2, б.

Типичный наклон ВтАХ на начальном участке кривой для тройного ЛД составил 2.4–2.6 Вт/А. Изготовленные

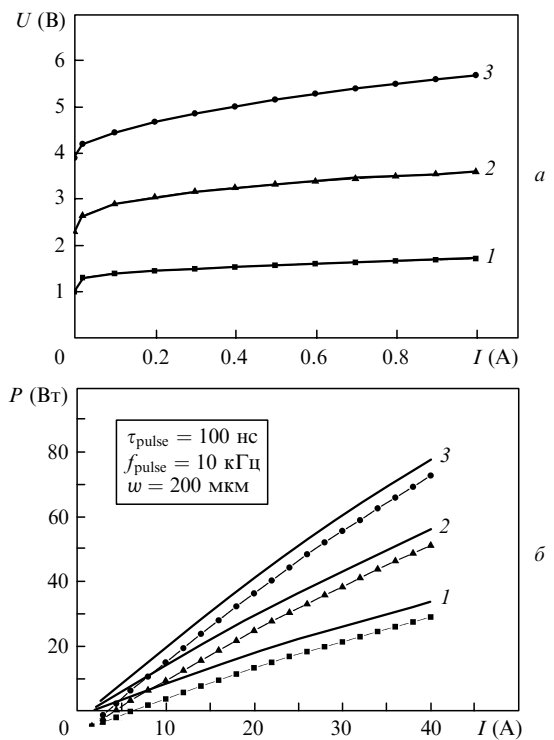


Рис. 2. Вольт-амперные (а) и ватт-амперные (б) характеристики эпитаксиально-интегрированных лазеров – одиночного ЛД (1), двойного ЛД (2) и тройного ЛД (3).

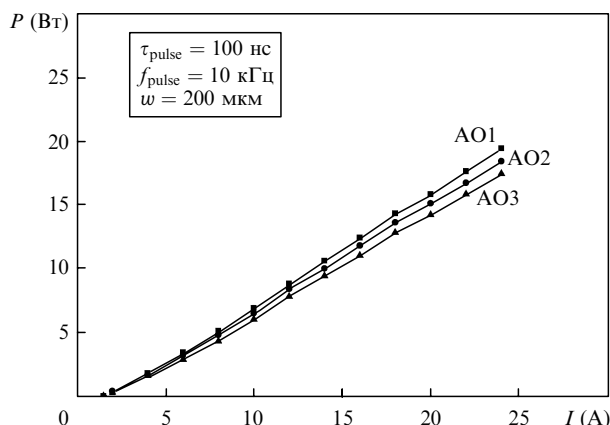


Рис.3. Зависимости оптической мощности отдельных излучающих активных областей (АО) тройного ЛД от тока накачки.

лазеры имели пороговый ток 1.5–2 А. Приблизительное равенство пороговых токов и линейность ВтАХ в широком диапазоне токов накачки для одиночного, двойного и тройного ЛД говорит о хорошей однородности выращенных эпитаксиальных гетероструктур, активные области которых идентичны друг другу.

На рис.3 показана зависимость оптической мощности каждой отдельно излучающей активной области тройного ЛД от тока накачки. Для проведения этих измерений изображение излучения на выходной зеркальной грани ЛД отдельной активной области увеличивалось микроскопом и выделялось с помощью щели, за которой был установлен измерительный приемник. При токе накачки 20 А мощность каждого ЛД составляла около 15 Вт, а типичный наклон ВтАХ для отдельных излучающих областей был в диапазоне 0.8–0.9 Вт/А. Из анализа рис.3 следует, что вся лазерная структура нагрета достаточно однородно. Это также видно из зависимостей спектра излучения ЛД с несколькими активными областями от тока, приведенных на рис.4. По своим тепловым характеристикам импульсные лазерные излучатели с несколькими активными областями близки к одиночным ЛД, т. к. с увеличением амплитуды тока накачки существенного разогрева кристалла не происходит.

На рис.5 представлены зависимости средней мощности импульса излучения от частоты следования импуль-

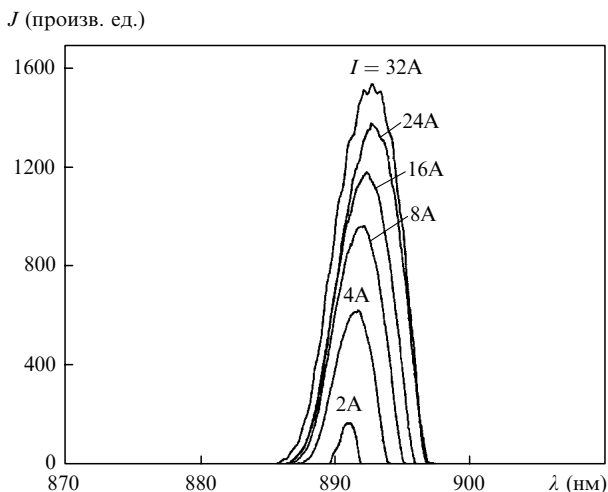


Рис.4. Спектры излучения тройного ЛД при различных токах накачки.

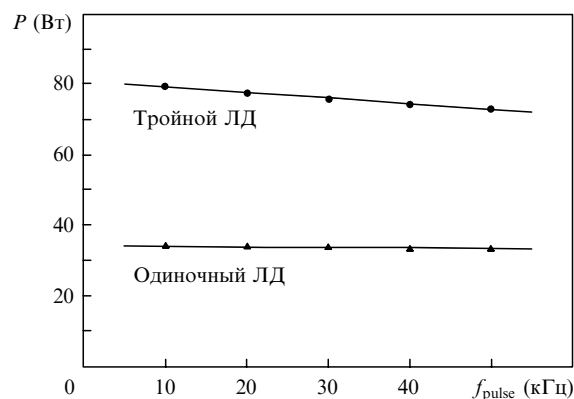


Рис.5. Мощность излучения одиночного ЛД и тройного интегрированного ЛД в зависимости от частоты следования импульсов накачки ($I_{\text{pulse}} = 40 \text{ А}$, $\tau_{\text{pulse}} = 100 \text{ нс}$).

сов тока накачки. Видно, что с ростом частоты от 10 до 50 кГц снижение мощности не превышает 10%. Эпитаксиальное интегрирование нескольких ЛД в одном полупроводниковом кристалле позволяет значительно расширить диапазон частот лазерных излучателей, работающих в импульсном режиме, в отличие от сборок отдельных ЛД в виде решеток и линеек, для которых предельные частоты следования импульсов накачки не превышают нескольких килогерц.

На рис.6 показаны зависимости мощности излучения тройного ЛД от температуры при фиксированной амплитуде импульса, из которых следует, что тройной интегрированный ЛД устойчиво работает в широком температурном интервале.

Таким образом, технология исследованных в настоящей работе эпитаксиально-интегрированных излучателей с несколькими активными областями, незначительно отличающихся по своим тепловым и частотным характеристикам от одиночных импульсных ЛД, является наиболее предпочтительной для последовательного соединения ЛД. Узкая диаграмма направленности, обеспечивающая концентрацию примерно 70%–80% генерируемой мощности в конусе с углом при вершине 30° , и близкое расположение всех излучающих областей друг к другу открывают новые возможности для применения данных приборов в источниках излучения высокой яркости.

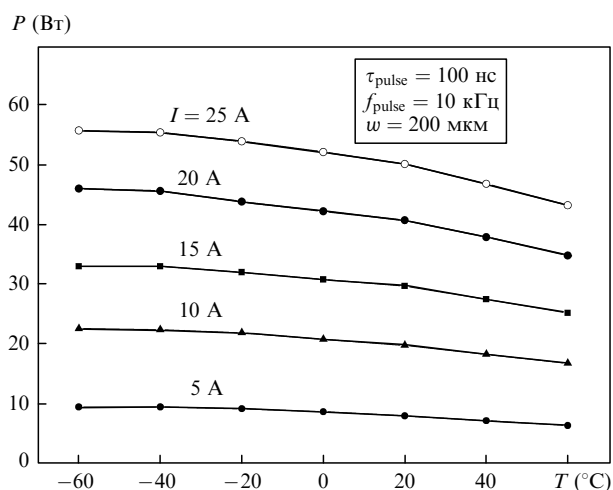


Рис.6. Зависимости мощности излучения тройного ЛД от температуры окружающей среды и тока накачки.

4. Заключение

В работе показано, что благодаря достигнутому уровню технологии выращивания высококачественных эпитаксиальных слоев методом МОС-гидридной эпитаксии становится возможным построение малогабаритных приборов на базе одного полупроводникового кристалла. Создание ЛД на основе тройных вертикально-интегрированных гетероструктур позволяет существенно увеличить оптическую мощность, излучаемую одним кристаллом.

Показано, что излучатель с тремя интегрированными ЛД может работать с частотой следования импульсов тока накачки не менее 50 кГц. Температурный диапазон устойчивой работы излучателей составляет $-60^{\circ}\dots + 60^{\circ}\text{C}$. Представленные ватт-амперные характеристики отдельных излучающих областей демонстрируют хорошее качество выращенных гетероструктур. Суммарная мощность излучателя на длине волны 0.9 мкм достигла 80 Вт при токе накачки 40 А.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта Президента РФ (номер проекта МД-4445.2008.8).

1. Iga K. *Jap. J. Appl. Phys.*, **47**, 1 (2008).
2. Малеев Н.А., Ковш А.Р., Жуков А.Е., Васильев А.П., Михрин С.С., Кузьменков А.Г., Бедарев Д.А., Задиранов Ю.М., Кулагина М.М., Шерняков Ю.М., Шуленков А.С., Быковский В.А., Соловьев Ю.М., Moller C., Леденцов Н.Н., Устинов В.М. *ФТП*, **37** (10), 1265 (2003).
3. Rogalski A., Chrzanowski K. *Opto-Electron. Rev.*, **10**, 2, 111 (2002).
4. Есаев Д.Г., Марчишин И.В., Овсяк В.Н., Савченко А.П., Фатеев В.А., Шашкин В.В., Сухарев А.В., Падалица А.А., Будкин И.В., Мармалюк А.А. *Автоматика*, **44** (4), 112 (2007).
5. Yu J.S., Slivken S., Darvish S.R., Evans A., Gokden B., Razeghi M. *Appl. Phys. Lett.*, **87**, 041104 (2005).
6. Бирюков А.А., Звонков Б.Н., Некорин С.М., Демина П.Б., Семенов Н.Н., Алешкин В.Я., Гавриленко В.И., Дубинов А.А., Маремьянин К.В., Морозов С.В., Белянин А.А., Кочаровский В.В., Кочаровский Вл.В. *ФТП*, **41** (10), 1226 (2007).
7. Зверков М.В., Коняев В.П., Кричевский В.В., Ладугин М.А., Мармалюк А.А., Падалица А.А., Симаков В.А., Сухарев А.В. *Квантовая электроника*, **38** (11), 989 (2008).
8. Krauss T.F., De La Rue R.M. *Progr. Quantum Electron.*, **23**, 51 (1999).
9. Блохин С.А., Усов О.А., Нащекин А.В., Аракчеева Е.М., Танклевская Е.М., Конников С.Г., Жуков А.Е., Максимов М.В., Леденцов Н.Н., Устинов В.М. *ФТП*, **40** (7), 833 (2006).
10. Al-Muhanna A., Mawst L.J., Botez D., Garbuzov D.Z., Martinelly R.U., Conolly J.C. *Appl. Phys. Lett.*, **73**, 1182 (1998).
11. 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., Слипченко С.О., Хомылев М.А., Тарасов И.С. *ФТП*, **40** (6), 628 (2006).
12. Belenky G.L., Donetsky D.V., Reynolds C.L., Kazarinov R.F., Shtengel G.E., Luryi S., Lopata J. *IEEE Photon. Tech. Lett.*, **9**, 1558 (1997).
13. Knauer A., Erbert G., Staske R., Sumpf B., Wenzel H., Weyers M. *Semicond. Sci. Technol.*, **20**, 621 (2005).
14. Botez D., Scifres D.R. *Diode Laser Arrays* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1994, p. 448).
15. Van der Ziel J.P., Tsang W.T. *Appl. Phys. Lett.*, **41**, 499 (1982).
16. Patterson S.G., Lau E.K., Pipe K.P., Kolodziejcki L.A. *Appl. Phys. Lett.*, **77**, 172, (2000).
17. Garcia Ch., Rosencher E., Collot Ph., Laurent N., Guyaux J.L., Vinter B., Nagle J. *Appl. Phys. Lett.*, **71**, 3752 (1997).
18. Stringfellow G.B. *Organometallic Vapor-Phase Epitaxy: Theory and Practice* (San Diego: Acad. Press, 1999, p. 585).