

Двойные интегрированные наноструктуры для импульсных лазерных диодов, излучающих на длине волны 0.9 мкм

М.В.Зверков, В.П.Коняев, В.В.Кричевский, М.А.Ладугин,
А.А.Мармалюк, А.А.Падалица, В.А.Симаков, А.В.Сухарев

Исследованы двойные интегрированные лазерные гетероструктуры на основе системы InGaAs/GaAs/AlGaAs, выращенные методом МОС-гидридной эпитаксии в едином эпитаксиальном процессе. Типичные значения наклона ватт-амперной характеристики для одиночного лазерного диода составили 1.08–1.15 Вт/А, а для двойного интегрированного они оказались существенно больше (1.88–2.01 Вт/А). Изготовленные двойные лазерные диоды, излучающие на длине волны около 0.9 мкм и работающие в импульсном режиме (100 нс, 10 кГц), позволили получить мощность излучения 50 Вт при токе накачки 30 А.

Ключевые слова: лазерный диод, интегрированные наноструктуры, МОС-гидридная эпитаксия.

1. Введение

В настоящее время полупроводниковые лазерные диоды (ЛД) находят многочисленные применения в различных областях науки и техники. Интерес к ЛД продолжает возрастать благодаря их высокой эффективности, миниатюрности, экономичности, надежности и гибкости технологии их производства. Особенно нужны такие приборы там, где требуется высокая выходная оптическая мощность.

Одним из путей повышения выходной мощности полупроводниковых излучателей является применение лазерных линеек и матриц [1]. Изготовление набора из одиночных ЛД позволяет увеличивать выходную мощность излучателя кратно количеству лазерных элементов в данной линейке. Для образования набора ЛД наиболее часто применяются вертикальный и горизонтальный способы соединения одиночных ЛД.

При горизонтальном способе получения лазерной линейки все диоды соединяются параллельно. Недостатком такого варианта соединения является ограниченность возможности источников накачки (источников питания), используемых для получения больших потребляемых токов, которые необходимы для достижения высокой выходной мощности.

Для того чтобы иметь низкие токи инжекции и высокие выходные мощности более предпочтительным является вертикальный способ соединения. ЛД в этом случае соединяются последовательно при помощи припайных контактов. Существенный недостаток вертикального соединения заключается в том, что излучающие пучки из активных областей (АО) лазеров составленной стопы не являются строго параллельными и чем больше таких ЛД в наборе, тем больше разориентация излучающих АО. Возникающие дополнительные контактные со-

противления являются еще одним минусом этого варианта соединения.

Наиболее перспективным на настоящий момент вариантом увеличения выходной оптической мощности излучателя является использование вертикальных интегрированных ЛД, выращенных в одном эпитаксиальном процессе. Впервые этот подход для изготовления набора ЛД был предложен в [2]. В этом варианте излучатель реализуется в виде монолитной каскадной полупроводниковой гетероструктуры, т. е. лазера с несколькими АО (рис.1). Соединение двух и более ЛД осуществляется при помощи специальных низкорезистивных контактных слоев между ними. В последнее время интерес к приборам подобного типа сильно возрос [3, 4].

Основными преимуществами излучателя с несколькими АО являются большая яркость излучения, которая определяется количеством активных областей, отсутствие дополнительных контактных сопротивлений, существенно уменьшающих КПД и предельную частоту следования импульсов, а также уменьшение расходов на его изготовление, т.к. исходная эпитаксиальная структура уже включает в себя все контактные соединения между ЛД. На настоящий момент основными трудностями при

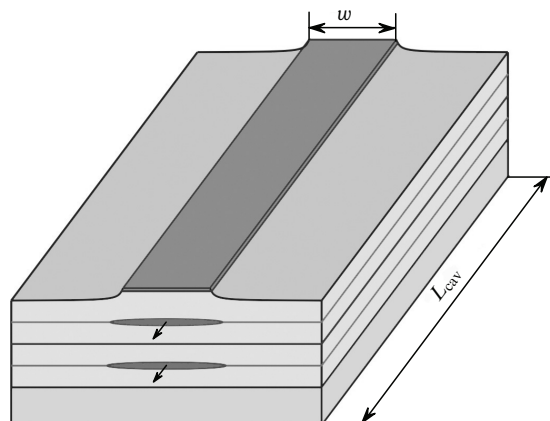


Рис.1. Геометрия лазерного элемента с двумя активными областями.

М.В.Зверков, В.П.Коняев, В.В.Кричевский, М.А.Ладугин, А.А.Мармалюк, А.А.Падалица, В.А.Симаков, А.В.Сухарев. ФГУП «НИИ "Полус" им. М.Ф. Стельмаха», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3; e-mail: M.Ladugin@siplus.ru

Поступила в редакцию 11 июля 2008 г.

создании интегрированного излучателя являются разработка геометрии соответствующих гетероструктур, в частности необходимых контактных слоев между соседними лазерами, а также получение сверходнородных ненапряженных многослойных структур с прецизионным контролем толщины, состава и уровня легирования слоев с хорошей резкостью гетерограниц.

Настоящая работа посвящена созданию и исследованию подобной интегрированной наноструктуры для мощного импульсного двухкаскадного лазерного диода, излучающего на длине волны 0.9 мкм.

2. Физический принцип работы интегрированного ЛД

Механизм работы интегрированного лазера, зонная диаграмма структуры которого схематично показана на рис.2, часто обсуждался во многих ранних работах [2, 5, 6]. Электрон, инжектированный в зону проводимости первого лазера (слева) и излучающий впоследствии фотон при переходе в валентную зону, попадает в зону проводимости второго лазера сквозь специально спроектированный контактный переход посредством туннелирования и вновь там излучает фотон. В идеальном случае любой инжектированный электрон будет давать столько квантов излучения, сколько содержится одиночных ЛД во всей эпитаксиальной структуре, увеличивая тем самым выходную мощность излучения. Квантовая эффективность данного прибора может значительно возрасти и быть даже больше 1.

При желании работа подобного интегрированного ЛД может осуществляться также и на различных длинах волн. Определенные результаты в данном направлении были продемонстрированы в [7, 8].

Специальный туннельный переход (ТП), расположенный между смежными ЛД, служит для обеспечения хорошего электрического контакта. Хотя подобные туннельные переходы находят широкое применение и в других оптоэлектронных приборах (фотоприемники, вертикально излучающие лазеры, солнечные батареи), их разработке и последующему выращиванию следует уделять особое внимание, т. к. от ТП зависит работа всего интегрированного лазерного диода. Необходимость получения высоколегированного вырожденного ТП объясняется тем, что с ростом уровня легирования слоев р- и n-типа проводимости резко увеличивается туннельный ток через переход. Ясное понимание принципа работы данного участка интегрированной структуры и его технологическое исполнение сильно влияют на полную эффектив-

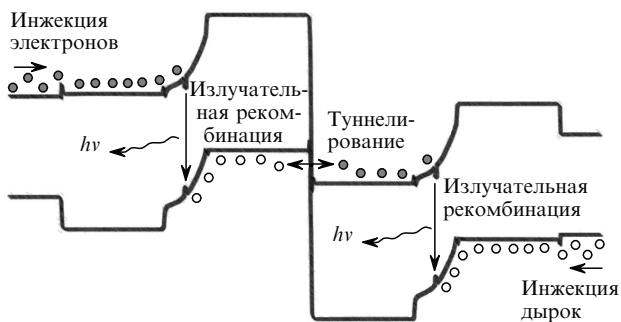


Рис.2. Зонная диаграмма интегрированного ЛД в условиях приложенного напряжения.

ность лазерной структуры. Например, в ранней работе [6], посвященной изготовлению подобных интегрированных лазеров, наблюдались изломы на ватт-амперных характеристиках, что было следствием начала лазерной генерации двух секций при различных пороговых токах. Причиной этого являлся неудовлетворительный электрический контакт между ЛД.

Из всего вышесказанного следует, что разработка и создание интегрированной наноструктуры для мощных импульсных лазерных диодов является сложной задачей, которая требует учета различных факторов, влияющих на его работу.

3. Эксперимент

Эпитаксиальные гетероструктуры для интегрированных ЛД на основе InGaAs/AlGaAs/GaAs, излучающих в диапазоне 0.9 мкм, были выращены методом МОС-гидридной эпитаксии. Рост осуществлялся при пониженном давлении в кварцевом реакторе горизонтального типа на установке «СИГМОС-130» с вращающимся графитовым подложкодержателем. В качестве источников третьей группы использовались триэтилгаллий ($Ga(C_2H_5)_3$), триметилалюминий ($Al(CH_3)_3$) и триметилиндий ($In(CH_3)_3$), а источником пятой группы служил высокочистый (100 %) арсин (AsH_3). В качестве газа-носителя использовался водород, очищенный методом диффузии через нагретый до $T = 450^\circ C$ палладиевый фильтр, с точкой росы не выше $-100^\circ C$.

Для изготовления высокоэффективных туннельных контактов требуются эпитаксиальные слои обоих типов проводимости с чрезвычайно высокими уровнями легирования (для получения вырождения). Кроме этого, легирующие примеси должны иметь как можно более низкие коэффициенты диффузии и малую энергию активации и не иметь так называемый эффект памяти. В качестве легирующих примесей, пригодных для указанных целей, были выбраны кремний и углерод. Источниками для них служили силан (SiH_4) и тетрахлорид углерода (CCl_4) соответственно. Данные примеси обладают вышеприведенными преимуществами и хорошо подходят для выращивания эпитаксиальных структур высокого качества в условиях МОС-гидридной эпитаксии [9].

Типичная геометрия выращиваемого эпитаксиального интегрированного лазерного диода представлена на рис.3.

Составы эмиттерных и волноводных слоев, а также толщина волновода и АО подбирались таким образом, чтобы обеспечить получение диаграммы направленности (угловая расходимость) излучения, не превышающей 20° в плоскости, которая перпендикулярна р – n-переходу

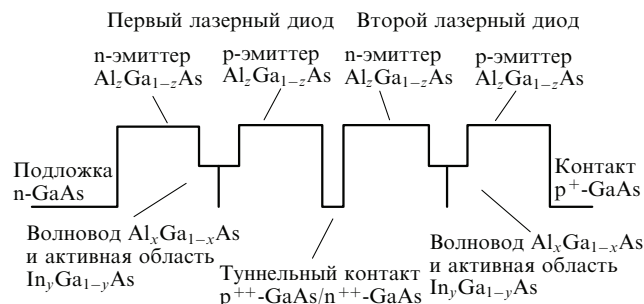


Рис.3. Схематическое изображение зонной диаграммы выращиваемого двойного ЛД.

по уровню 0.5 от максимума [10]. Геометрия квантово-размерной АО была выбрана для осуществления генерации на длине волны 900 нм.

Толщины эмиттерных слоев (~ 1.5 мкм) были выбраны с учетом того, что излучение из АО не должно проникать в сильнолегированный ТП, т. к. это приводит к поглощению излучения.

Для измерения излучательных и электрических характеристик были изготовлены лазерные элементы с шириной контакта $w = 100$ мкм и длиной резонатора $L_{cav} = 1000$ мкм. Коэффициенты отражения передней R_{fr} и задней R_{rear} граней резонатора с нанесенными оптическими покрытиями составляли 0.03–0.05 и не менее 0.95 соответственно.

4. Полученные результаты и их обсуждение

Все измерения проводились в импульсном режиме накачки, длительность и частота повторения импульсов тока составляли 100 нс и 10 кГц. Как и ожидалось, при вертикальном последовательном соединении диодов падение напряжения на всей лазерной гетероструктуре увеличилось пропорционально количеству интегрированных ЛД. К этому падению прибавилось также небольшое дополнительное падение напряжения на ТП между диодами. Так, из графика вольт-амперной характеристики, представленного на рис.4, видно, что для интегрированной гетероструктуры двойного лазера падение напряжения увеличилось приблизительно в два раза. Ти-

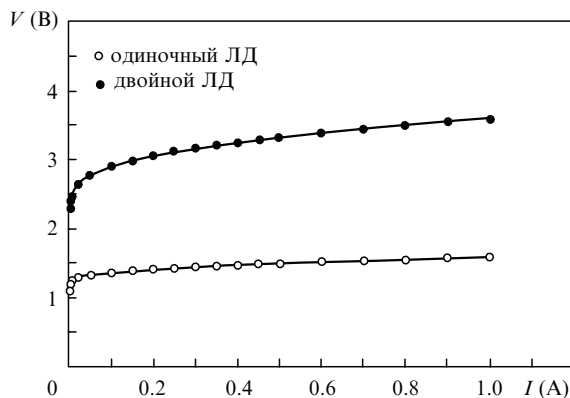


Рис.4. Вольт-амперная характеристика одиночного и двойного ЛД.

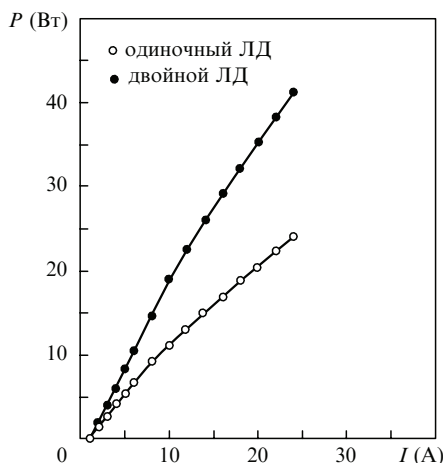


Рис.5. Типичные ватт-амперные характеристики одиночного и двойного ЛД.

пичные напряжения отсечки для одиночных и двойных ЛД составляли 1.35–1.4 и 2.8–3.0 В соответственно.

Ватт-амперные характеристики одиночного и двойного ЛД показаны на рис.5. Все лазерные элементы имели пороговый ток около 1 А. Выше порога генерации наклон кривой $P(I)$ для эпитаксиальной гетероструктуры, состоящей из двух лазеров, приблизительно в 1.75 раза больше наклона кривой для структуры из одного ЛД.

Отсутствие изломов ватт-амперной характеристики говорит о равенстве пороговых токов обеих секций интегрированного лазера, что свидетельствует о хорошей однородности выращенных эпитаксиальных гетероструктур. Минимизация электрических потерь в ТП, а также токовых утечек помогла улучшить работу интегрированного ЛД. Типичный наклон характеристики на начальном участке кривой (до 10 А) для одиночного ЛД составил 1.08–1.15 Вт/А, а для двойного интегрированного ЛД – 1.88–2.01 Вт/А.

Следует особо отметить, что при измерениях излучательных характеристик одиночного и двойного ЛД вид ватт-амперной характеристики не изменялся вплоть до частоты следования импульсов 20 кГц.

Представленные на рис.6 спектры свидетельствуют, что с увеличением тока накачки длина волны генерации практически не изменяется. Это говорит о том, что разогрев кристалла на теплоотводе невелик.

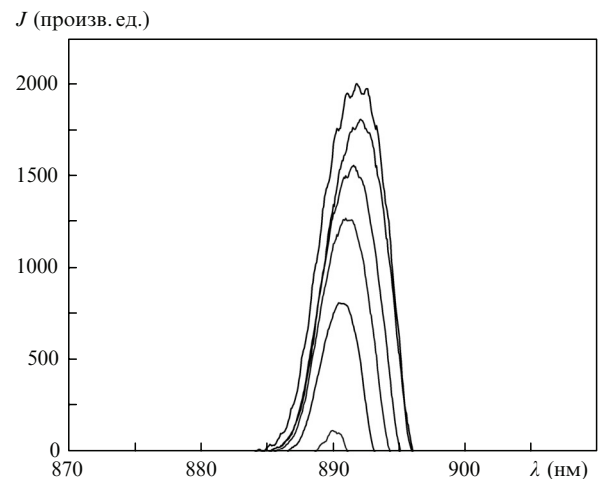


Рис.6. Спектры излучения двойного ЛД при различных токах.

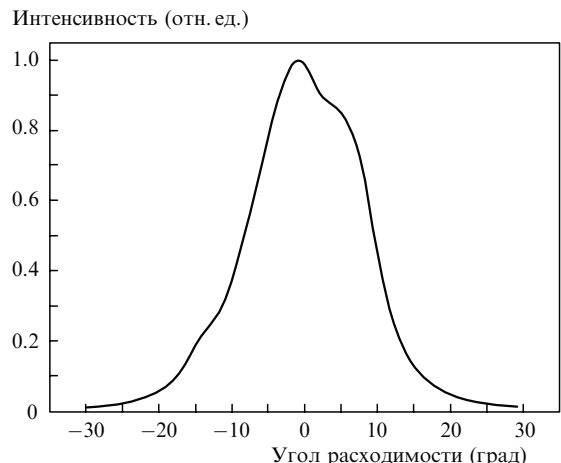


Рис.7. Диаграмма направленности излучения двойного ЛД в плоскости, перпендикулярной p–n-переходу.

Картина дальнего поля для двойного интегрированного ЛД показана на рис.7. Углы расходимости излучения в перпендикулярной (Θ_{\perp}) и параллельной (Θ_{\parallel}) р-п-переходу плоскостях были равны 18° и 8° соответственно. Значение Θ_{\perp} хорошо согласуется с расчетным углом расходимости в вертикальной плоскости ($18^{\circ} - 20^{\circ}$), полученным с помощью использованной геометрии эпитаксиальных слоев гетероструктуры.

5. Заключение

Исследованные в настоящей работе двойные интегрированные лазерные гетероструктуры на основе InGaAs/GaAs/AlGaAs, выращенные методом МОС-гидридной эпитаксии в едином эпитаксиальном процессе, продемонстрировали возможность получения перспективного излучателя – интегрированного лазерного диода. Наклон ватт-амперной характеристики для эпитаксиальной гетероструктуры, состоящей из двух лазеров, увеличился в 1.75 раза по сравнению со структурой из одного ЛД.

Созданные нами мощные импульсные лазерные диоды с несколькими активными областями, излучающие на

длине волны около 0.9 мкм, позволили получить мощность излучения 50 Вт при токе накачки 30 А.

Работа была выполнена при частичной поддержке гранта Президента РФ (проект № МД-4445.2008.8).

1. Ayling S.G., Wight D.R., Allenson M.B., Hilton K.P., Smith G.W. *IEEE Microwave Photonics*, **10**, 161 (1998).
2. Van der Ziel J.P., Tsang W.T. *Appl. Phys. Lett.*, **41**, 499 (1982).
3. Behringer M., Eberhard F., Herrmann G., Luft J., Maric J., Morgott S., Philippens M., Teich W. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4831**, 4 (2003).
4. Guo W., Shen G., Li J., Wang T., Gao G., Zou D. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5452**, 250 (2004).
5. Garcia Ch., Rosencher E., Collot Ph., Laurent N., Guyaux J.L., Vinter B., Nagle J. *Appl. Phys. Lett.*, **71**, 3752 (1997).
6. Patterson S.G., Lau E.K., Pipe K.P., Kolodziejski L.A. *Appl. Phys. Lett.*, **77**, 172 (2000).
7. Guo W., Shen G., Li J., Wang T., Gao G., Zou D. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5623**, 217 (2005).
8. Yang R.Q., Qiu Y. *J. Appl. Phys.*, **94**, 7370 (2003).
9. Stringfellow G.B. *Organometallic Vapor Phase Epitaxy: Theory and Practice* (Boston: Academic Press, 1999, p. 585).
10. Булаев П.В., Мармалюк А.А., Падалица А.А., Никитин Д.Б., Петровский А.В., Залевский И.Д., Коняев В.П., Оськин В.В., Зверков М.В., Симаков В.А., Зверев Г.М. *Квантовая электроника*, **32**, 213 (2002).