

Мощные одномодовые лазерные диоды на основе квантоворазмерных гетероструктур InGaAs/AlGaAs, легированных углеродом

Е.И.Давыдова, М.А.Ладугин, А.А.Мармалюк, А.А.Падалица,
А.В.Петровский, А.В.Сухарев, М.Б.Успенский, В.А.Шишкин

Изучены излучательные характеристики одномодовых лазерных диодов на основе гетероструктур InGaAs/GaAs/AlGaAs, легированных углеродом и выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии. Полученные результаты показали, что сохранение на всех этапах изготовления активного элемента полупроводникового лазера заданного профиля легирования, обеспечивающего оптимизацию последовательного сопротивления и внутренних оптических потерь, приводит к повышению эффективности работы лазера. На основе исследованных лазерных гетероструктур созданы высокоэффективные лазерные диоды, работающие на одной поперечной моде, с длиной волны генерации 980 нм и максимальной мощностью 300 мВт.

Ключевые слова: одномодовый полупроводниковый лазер, выходная мощность, легирование, тетрагидрид углерода, МОС-гидридная эпитаксия.

1. Введение

Растущие требования к выходной мощности и долговечности работы одномодовых лазерных диодов (ЛД), излучающих в диапазоне 900–1000 нм, обуславливают необходимость непрерывного совершенствования технологии изготовления и конструкции эпитаксиальных гетероструктур (ГС) [1, 2].

Как показали результаты работ [3, 4], при разработке лазерной ГС необходимо обращать особое внимание на профиль легирования р-эмиттера в непосредственной близости от гетерограницы с волноводом. Размытие номинального профиля легирования, наблюдаемое при использовании традиционной легирующей примеси (цинк), приводит к росту внутренних оптических потерь и может вызывать ухудшение электрических характеристик ЛД.

В настоящей работе обсуждается возможность решения этой проблемы при использовании другой легирующей примеси, профиль которой искажается в значительно меньшей степени как при эпитаксиальном росте, так и в процессе дальнейшей технологической обработки ГС. Показано значительное влияние проведенной оптимизации на параметры изготавливаемых одномодовых ЛД.

2. Эксперимент

Квантоворазмерные лазерные ГС InGaAs/GaAs/AlGaAs были выращены методом МОС-гидридной эпитаксии при пониженном давлении в кварцевом реакторе горизонтального типа на установке «СИГМОС-130» с вращающимся графитовым подложкодержателем. Триэтилгаллий (TEGa), триметилалюминий (ТМАl) и триметилиндий (ТМIn) использовались в качестве источников эле-

ментов третьей группы, а 100 %-ный арсин (AsH₃) служил источником элементов пятой группы. В качестве источника легирующей примеси n-типа использовался силан (SiH₄), а источниками легирующей примеси p-типа были тетрагидрид углерода (CCl₄) и диэтилцинк (DEZn). В качестве газа-носителя использовался водород, очищенный методом диффузии через нагретый до $T = 450$ °С палладиевый фильтр, с точкой росы не выше –100 °С.

В работе исследовались две лазерные ГС, имевшие одинаковую конструкцию [1] и отличавшиеся типом легирующей примеси р-эмиттера. В первой ГС в качестве примеси р-типа использовался цинк, а во второй ГС – углерод. Состав активной области лазерных ГС обеспечивал длину волны электролюминесценции 960–965 нм. Детали дизайна ГС и конструкции активного элемента одномодового гребнёвого ЛД описаны в [2]. Конструкция гребнёвого ЛД показана на рис. 1. Исследованные ЛД имели длину резонатора 1000 мкм, коэффициенты отражения переднего и заднего зеркал составляли 0.03 и 0.98 соответственно. Лазерные кристаллы со стороны р-контакта напаивались на медный теплоотвод с помощью индиевого припоя. Для измерения электрических и оптических параметров ЛД закреплялись в держателях с прижимным контактом.

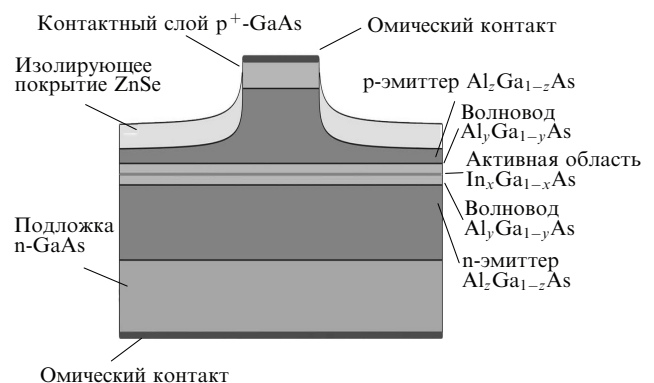


Рис. 1. Схема гребнёвого лазерного диода.

Е.И.Давыдова, М.А.Ладугин, А.А.Мармалюк, А.А.Падалица, А.В.Петровский, А.В.Сухарев, М.Б.Успенский, В.А.Шишкин. ФГУП «НИИ "Полус" им. М.Ф.Стельмаха», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3; e-mail: M.Ladugin@siplus.ru

Поступила в редакцию 24 июня 2008 г.

3. Обсуждение результатов

В настоящее время в качестве легирующей примеси р-типа для эпитаксиальных слоев (Al)GaAs используется цинк [1–4]. Характерной особенностью этой легирующей примеси является высокая степень диффузии, что приводит к перераспределению атомов цинка в процессе эпитаксиального роста и последующих технологических операций с ГС. Кроме того, в процессе роста происходит адсорбция реагентов цинка на внутренних поверхностях ростовой камеры и газовых линий, приводящая к «эффекту памяти» [5]. Все это затрудняет получение профилей легирования с контролируемым изменением концентрации примеси при использовании цинка.

Известно, что низкий уровень легирования р-эмиттера вблизи гетерограницы р-эмиттер–волновод приводит при подаче смещения к дополнительному падению напряжения на данном участке ГС, а также вызывает увеличение дифференциального последовательного сопротивления ЛД [3]. В результате в значительной мере снижается эффективность его работы, увеличивается тепловыделение в активной области, что негативно сказывается как на максимально достижимой мощности, так и на ресурсе работы лазера. Вместе с тем, завышение уровня легирования р-эмиттерного слоя приводит к росту уровня поглощения на свободных носителях в эмиттере и увеличению оптических потерь [3]. В этом случае происходит снижение дифференциальной эффективности и КПД ЛД. Таким образом, при создании лазерных ГС профиль легирования эмиттерных слоев должен точно контролироваться в процессе роста и как можно меньше отклоняться от оптимального распределения.

Решить данную проблему может использование акцепторной примеси с низким коэффициентом диффузии. В качестве такой примеси был выбран углерод [6]. Кроме того, углеродное легирование обеспечивает возможность получения высоких уровней концентрации примеси р-типа, что необходимо для создания низкоомных эмиттерных и контактных слоев. Для этой примеси отсутствует «эффект памяти», она имеет малую энергию активации [6, 7].

В настоящей работе в качестве лигатуры р-типа использовался тетрахлорид углерода CCl_4 , который обеспечивает возможность получения в условиях МОС-гидридной эпитаксии контролируемых уровней легирования эпитаксиальных слоев AlGaAs хорошего качества в широком диапазоне концентраций дырок с резкими профилями легирования [7].

В результате замены акцепторной примеси на углерод при легировании лазерных ГС существенно повысилась стабильность уровня мощности одномодового излучения лазера P_{SM} . Для одномодовых ЛД на основе ГС, легированной цинком, P_{SM} составляла 170–190 мВт, а её максимальное значение достигало 210 мВт [2]. Для ЛД на основе ГС, легированной углеродом, характерные значения $P_{SM} = 240–280$ мВт, а максимальная мощность в одномодовом режиме превышала 300 мВт.

Типичные диаграммы расходимости излучения ЛД на основе легированной углеродом ГС в плоскостях, перпендикулярной (θ_{\perp}) и параллельной (θ_{\parallel}) р–п-переходу, представлены на рис.2. Распределения интенсивности хорошо аппроксимируются гауссовыми кривыми. Положение максимума распределения при изменении тока накачки практически не смещается (погрешность измере-

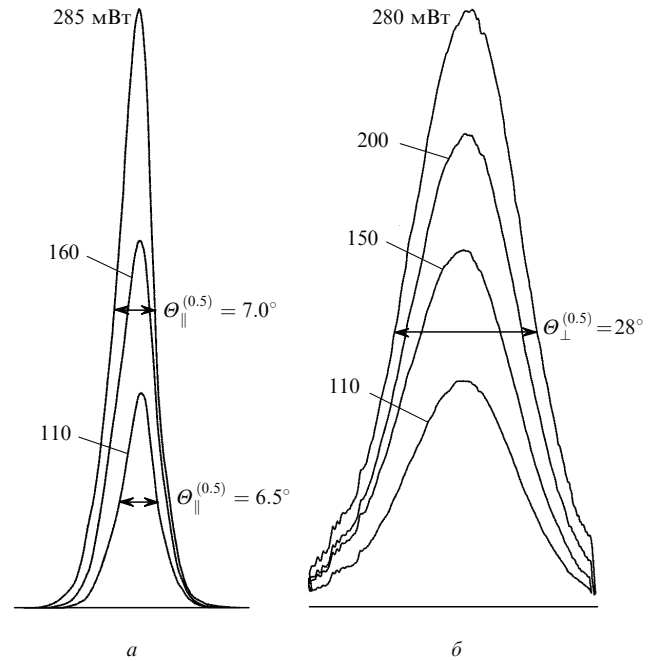


Рис.2. Типичные диаграммы расходимости ЛД, изготовленного на основе легированной углеродом ГС, в параллельной (а) и перпендикулярной (б) р–п-переходу плоскостях.

ния 0.5°). Ширина на полувысоте распределения в параллельной плоскости с ростом тока незначительно увеличивалась (не более чем на 1°). В параллельной плоскости ширина составила $7–8^\circ$, а в перпендикулярной – $28–30^\circ$.

Следует отметить, что повысился максимальный (до момента начала катастрофической оптической деградации) ток накачки. На рис.3 представлена типичная ватт-амперная характеристика ЛД данной ГС. Пороговый ток накачки составляет $40–45$ мА, дифференциальная эффективность в одномодовом режиме $1.04–1.05$ Вт/А. При переходе в режим многомодовой генерации наблюдается нелинейность ватт-амперной характеристики. Дальнейшее увеличение тока накачки приводит к восстановлению величины дифференциальной эффективности и к росту мощности до $480–490$ мВт, после чего наступает катастрофическая оптическая деградация. В аналогичных испытаниях ЛД, изготовленные из легированных цинком ГС, разрушались при накачке не более $240–280$ мА.

Полученный результат подчеркивает актуальность вопросов контроля распределения легирующей примеси

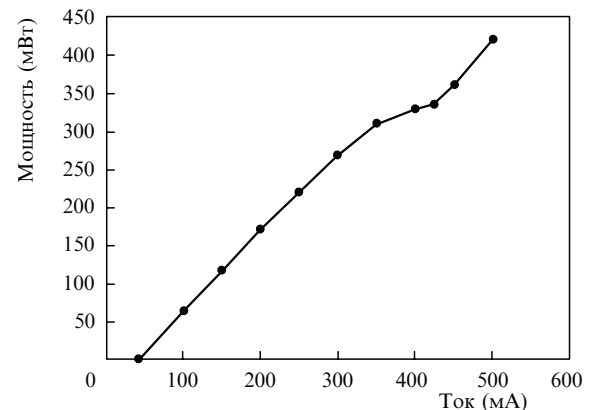


Рис.3. Типичная ватт-амперная характеристика ЛД, изготовленного на основе легированной углеродом ГС.

в эмиттерных слоях в непосредственной близости от волновода для лазерных ГС. Кроме того, возможность значительного увеличения выходной мощности ЛД свидетельствует о сохранении заданного профиля углеродного легирования на всех стадиях изготовления лазеров.

4. Заключение

Полученные в данной работе результаты показывают, что сохранение заданного профиля, обеспечивающего оптимизацию последовательного сопротивления и внутренних оптических потерь, на всех этапах изготовления лазерного элемента приводит к повышению эффективности работы ЛД.

Исследованные в настоящей работе лазерные ГС на основе InGaAs/GaAs/AlGaAs, легированные углеродом и выращенные методом МОС-гидридной эпитаксии, обеспечили возможность создания высокоэффективных одномодовых ЛД с длиной волны генерации 980 нм и максимальной мощностью в одномодовом режиме 300 мВт.

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

1. Поповичев В.В., Давыдова Е.И., Мармалюк А.А., Симаков А.В., Успенский М.Б., Чельный А.А., Богатов А.П., Дракин А.Е., Плюсюк С.А., Стратонников А.А. *Квантовая электроника*, **32**, 1099 (2002).
2. Давыдова Е.И., Зубанов А.В., Мармалюк А.А., Успенский М.Б., Шишкин В.А. *Квантовая электроника*, **34**, 805 (2004).
3. Belenky G.L., Reynolds C.L. Jr., Donetsky D.V., Shtengel G.E., Hybertsen M.S., Alam M.A., Baraff G.A., Smith R.K., Kazarinov R.F., Winn J., Smith L.E. *IEEE J. Quantum Electron.*, **35**, 1515 (1999).
4. Chelny A.A., Kobayakova M.Sh., Eliseev P.G. *IEEE J. Quantum Electron.*, **40**, 113 (2004).
5. Nelson A.W., WestBrook L.D. *J. Crystal Growth*, **68**, 102 (1984).
6. Bulaev P.V., Marmalyuk A.A., Padalitsa A.A., Nikitin D.B., Zalevsky I.D., Kapitonov V.A., Nikolaev D.N., Pikhtin N.A., Lyutetskiy A.V., Tarasov I.S. *J. Crystal Growth*, **248**, 114 (2003).
7. Cunningham B.T., Baker J.E., Stillman G.E. *Appl. Phys. Lett.*, **56**, 836 (1990).