

Линейки лазерных диодов на основе гетероструктур AlGaPAs/GaAs с компенсацией механических напряжений

А.А.Мармалюк, М.А.Ладугин, И.В.Яроцкая, В.А.Панарин, Г.Т.Микаелян

Методом МОС-гидридной эпитаксии выращены и исследованы лазерные гетероструктуры: традиционные – в системе AlGaAs/GaAs и «скомпенсированные» фосфором – в системе AlGaAs/AlGaPAs/GaAs, излучающие на длине волны 850 нм. Изготовлены линейки лазерных диодов и исследованы их выходные характеристики. Примененная методика роста гетерослоев позволила управлять механическими напряжениями (с целью их минимизации) в лазерной гетероструктуре AlGaPAs/GaAs, благодаря этому удалось сохранить ее кривизну на уровне исходной кривизны подложки. Показано, что использование скомпенсированной гетероструктуры AlGaPAs/GaAs улучшает линейное распределение излучающих элементов в ближнем поле линеек лазерных диодов и способствует сохранению наклона ватт-амперной характеристики при высоких токах накачки благодаря однородному контакту с теплоотводом всех излучающих элементов. Радиус кривизны выращенных скомпенсированных гетероструктур оказался меньше, чем у традиционных.

Ключевые слова: линейки лазерных диодов, эпитаксиальные гетероструктуры, механические напряжения, диаграмма направленности.

1. Введение

Полупроводниковые гетероструктуры (ГС) AlGaAs/GaAs широко применяются в современной лазерной технике, в частности при создании лазерных диодов (ЛД), излучающих в спектральном диапазоне 700–870 нм [1]. Данная система материалов традиционно считается «идеальной» с точки зрения согласованности периодов решетки полупроводниковой подложки с эпитаксиальными слоями. Для нее не требуются дополнительные технологические мероприятия по управлению механическими напряжениями при выращивании кристаллических слоев ГС высокого качества, которые необходимы для других систем (например, AlGaInP/GaAs, GaInPAs/InP, AlGaInAs/InP) [2]. Однако, несмотря на отсутствие дислокаций несоответствия, в таких ГС присутствуют остаточные механические напряжения и их величина не превышает порога образования дислокаций несоответствия. Указанные механические напряжения приводят к изгибу пластины с ГС после ее утончения в планарном цикле изготовления ЛД, что оказывается существенным для ряда практических применений. Именно ими во многом обусловлен изгиб линеек ЛД – так называемый смайл [3, 4]. Появление смайла усложняет процесс монтажа линеек, увеличивает тепловое сопротивление приборов и ухудшает фокусировку лазерных пучков.

Очевидное решение указанной проблемы – снижение уровня механических напряжений в ГС путем контроля

периодов решетки отдельных слоев, составляющих ГС, как это осуществляется в ГС на основе AlGaInP/GaAs, GaInPAs/InP, AlGaInAs/InP и др. [2]. Одним из возможных способов уменьшения механических напряжений применительно к рассматриваемым ГС AlGaAs/GaAs является введение фосфора в состав твердого раствора для компенсации разности периодов решетки осаждаемых слоев и подложки.

Цель настоящей работы – изучение применимости данного подхода на примере лазерных ГС AlGaAs/GaAs для линеек ЛД с длиной волны излучения 850 нм.

2. Эксперимент

Эпитаксиальные ГС на основе AlGaAs/GaAs и AlGaAs/AlGaPAs/GaAs были выращены методом МОС-гидридной эпитаксии на установке с реактором горизонтального типа Сигмос-130. В качестве источников использовались триметилгаллий, триметилалюминий, диэтилцинк, силан, арсин и фосфин. Газом-носителем являлся водород. Рост осуществлялся на подложках n-GaAs (100). Исследовались два типа ГС. Двойные ГС с отдельным ограничением имели две арсенид-галлиевые квантовые ямы и симметричные волноводы Al_{0,37}Ga_{0,63}As. Эмиттерные слои в первом случае имели состав Al_{0,60}Ga_{0,40}As (традиционная конструкция), во втором – Al_{0,60}Ga_{0,40}P_{0,03}As_{0,97}, где мольная доля фосфора рассчитывалась исходя из величины механических напряжений в ГС.

Структуры были исследованы методом рентгеновской дифрактометрии на установке «Vektor». Дополнительно измерялся радиус кривизны ГС методом оптической рефлектометрии при помощи системы «EpiCurveTT».

На основе полученных ГС изготавливались лазерные элементы с шириной контакта $W = 150$ мкм и длиной резонатора $L = 1000$ мкм. Коэффициенты отражения передней и задней граней резонатора с нанесенными оптиче-

А.А.Мармалюк, М.А.Ладугин, И.В.Яроцкая. ООО «Сигм Плюс», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3;
e-mail: A.Marmalyuk@splus.ru

В.А.Панарин, Г.Т.Микаелян. ОАО «НПП «Инжект», Россия, 410052 Саратов, просп. 50 лет Октября, 101

Поступила в редакцию 29 сентября 2011 г., после доработки – 14 октября 2011 г.

скими покрытиями (R_1 и R_2) составили соответственно 0.03–0.05 и 0.95–0.98. Из лазерных элементов были сформированы линейки длиной 5 мм из десяти ЛД с коэффициентом заполнения 30% и исследованы их выходные характеристики.

3. Результаты измерений

Наличие остаточных напряжений в лазерных ГС AlGaAs/GaAs обусловлено различием периодов решеток подложки GaAs и многослойной композиции на основе твердых растворов $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Однако поскольку период решетки AlAs (0.56622 нм) больше, чем у GaAs (0.565321 нм) [5], то для всех составов $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x = 0-1$) эта разность не равна нулю. Следовательно, оставаясь только в данной системе материалов, невозможно сбалансировать механические напряжения в ГС. Выходом из этой ситуации является переход от трехкомпонентной к четырехкомпонентной системе материалов, в состав которой дополнительно входит элемент, обеспечивающий возможность уменьшения периода кристаллической решетки. Этим элементом в нашем случае является фосфор, добавление которого к $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ позволяет расширить диапазон вариации периодов решетки за счет того, что период решетки фосфорсодержащих бинарных соединений (AlP и GaP), входящих в состав нового твердого раствора $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-y}\text{P}_y\text{As}_{1-y}$, меньше, чем эта величина для подложки GaAs ($a_{\text{AlP}} = 0.5451$ нм и $a_{\text{GaP}} = 0.54495$ нм [5]).

Существуют два способа создания ГС с компенсацией механических напряжений. В рамках первого из них в каждый слой ГС $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}_y\text{As}_{1-y}$ для заданного x подбирается такое значение y , чтобы периоды решетки слоя и подложки GaAs совпадали. Второй же способ предусматривает создание в рамках одной ГС слоев с разноименными напряжениями, причем так, чтобы суммарные механические напряжения были близки к нулю. При этом важно, чтобы толщина напряженных слоев в ГС не превысила критическую для выбранных составов. Первый вариант достаточно трудоемок для исполнения, поэтому мы остановились на втором. Среди возможных способов реализации такого подхода выбран вариант с конструкцией ГС, содержащей эмиттерные слои AlGaPAs. В этом случае активная область и волноводные слои остаются без изменений, как в традиционных ГС AlGaAs/GaAs, что позволяет более отчетливо выявить влияние компенсации механических напряжений на уровень выходных характеристик излучателей.

Для сравнения результатов были сформированы две ГС: одна традиционная (AlGaAs/GaAs), а другая с компенсацией механических напряжений (AlGaPAs/GaAs). На рис.1 представлены рентгеновские кривые качания выращенных лазерных структур. Хорошо видно, что пик, соответствующий эмиттерному слою лазерной структуры (пик CL), смещается при добавлении фосфора. Период решетки фосфорсодержащего эмиттерного слоя становится меньше периода решетки подложки, и соответствующий

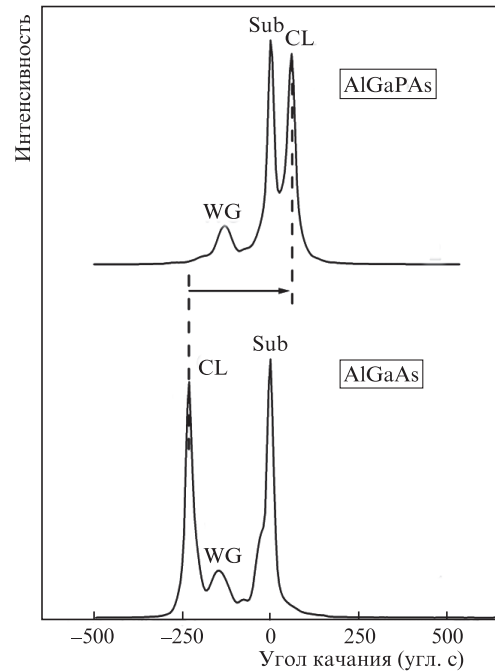


Рис.1. Кривые качания ГС без фосфора (AlGaAs) и с добавлением фосфора (AlGaPAs). Пики CL, WG и Sub соответствуют эмиттерному слою, волноводному слою и подложке.

пик появляется по другую сторону от «подложечного» пика (пик Sub). Это связано с тем, что количество вводимого фосфора рассчитывалось исходя из необходимости компенсации напряжений не только в одном слое, но и по всей толщине ГС. При этом заметим, что состав волноводного слоя не изменился (пик WG).

В зависимости от разности периодов решетки и толщин осаждаемых слоев гетероструктура может быть изогнута в ту или иную сторону, а радиус прогиба может становиться положительным или отрицательным. Для анализа рассматриваемого явления удобно пользоваться обратной величиной радиуса прогиба – кривизной. Чем больше численное значение кривизны, тем больше фактическое искривление ГС.

По данным рентгеновских измерений была рассчитана кривизна исследуемых ГС [6]. Результаты расчетов и измерений кривизны методом оптической рефлектометрии [7] представлены в табл.1. Общая толщина осажденных слоев в обеих ГС составляла 4.75 мкм. При этом рассогласование и кривизна ГС со слоями AlGaPAs снизились на порядок по сравнению со стандартными ГС AlGaAs/GaAs. Полученный результат практически совпадает с исходной кривизной подложки, которая составляла 0.014 м^{-1} . Видно, что данный подход позволяет снизить суммарные механические напряжения и, как следствие, уменьшить кривизну ГС.

Из указанных ГС были изготовлены линейки ЛД и исследованы их характеристики. Фотографии ближнего

Табл.1. Параметры исследованных гетероструктур.

Система материалов	Толщина эпитаксиальных слоев (мкм)	Усредненное рассогласование параметров решетки ГС $\Delta a/a$ (%)	Кривизна прогиба ГС (м^{-1})	
			рентгеновская дифрактометрия	оптическая рефлектометрия
AlGaAs/GaAs	4.75	-0.0735	-0.12	-0.14
AlGaPAs/GaAs	4.75	0.0093	0.015	0.015



Рис.2. Картины ближних полей излучения линеек ЛД: на основе ГС AlGaAs (а; расположение излучающих элементов по вертикали неравномерное) и на основе ГС AlGaPAs (б; расположение излучающих элементов равномерное, ближнее поле без смайла).

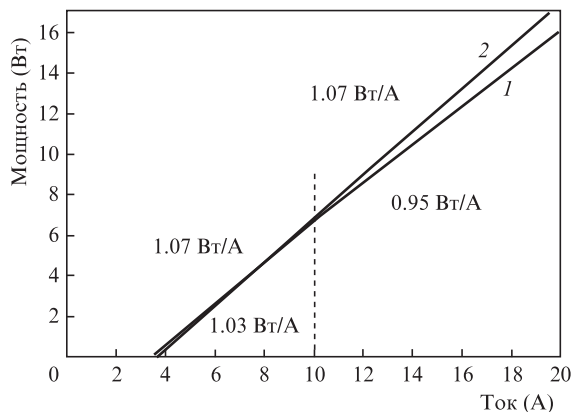


Рис.3. Ватт-амперные характеристики линеек ЛД (20 Гц, 200 мкс): на основе ГС без фосфора (1) и ГС с добавлением фосфора (2). На кривой 1 при токах выше 10 А заметен изгиб, связанный с тепловым разогревом.

поля излучения линеек ЛД на основе стандартных ГС AlGaAs/GaAs (без компенсации напряжений) и исследуемых AlGaPAs/GaAs (с компенсацией механических напряжений) приведены на рис.2. Видно, что линейка ЛД на основе компенсированной структуры AlGaPAs не имеет заметного теплового изгиба, характерного для стандартных линеек.

На рис.3 представлены ватт-амперные характеристики исследуемых линеек ЛД в квазинепрерывном режиме работы. Пороговые токи линеек имели близкие значения и составили 3.5 и 3.6 А для структур без фосфора и фосфорсодержащих соответственно. Как следует из рисунка, на начальном участке эффективность линеек ЛД практически совпадает. Однако при токах накачки свыше 10 А наклон кривой ватт-амперной характеристики линейки на основе компенсированной ГС сохраняется на первоначальном уровне 1.07 Вт/А, в то время как наклон для стандартного образца линейки ЛД уменьшается до 0.95

Вт/А. Этот факт объясняется тем, что линейки на основе ГС, скомпенсированных фосфором, меньше искривлены и имеют лучший контакт с теплоотводом по всей своей длине. Это особенно важно при больших токах накачки, когда выделение тепла в кристалле лазерного диода существенно возрастает. Компенсация механических напряжений в ГС в данном случае позволяет уменьшить тепловой изгиб ватт-амперной характеристики. Таким образом, линейки ЛД на основе фосфорсодержащей структуры демонстрируют более стабильную работу при повышенных токах накачки, что указывает на необходимость и полезность реализации рассматриваемого подхода.

4. Выводы

В настоящей работе изготовлены и исследованы традиционные лазерные гетероструктуры AlGaAs/GaAs и скомпенсированные гетероструктуры в системе AlGaAs/AlGaPAs/GaAs, а также линейки ЛД на их основе, излучающие на длине волны 850 нм. Результаты измерений радиуса кривизны показывают, что введение в гетероструктуры AlGaAs/GaAs слоев, содержащих фосфор, способствует снижению механических напряжений и, следовательно, препятствует изгибу многослойных гетероструктур. Показано, что использование скомпенсированной гетероструктуры AlGaPAs/GaAs улучшает ближнее поле линеек ЛД и способствует сохранению наклона ватт-амперной характеристики при высоких токах накачки благодаря более однородному, чем в случае линеек на основе AlGaAs/GaAs, тепловому контакту всех излучающих элементов линейки лазерных диодов с теплоотводом (в том числе и расположенных ближе к краям).

1. Елисеев П.Г. *Квантовая электроника*, **32**, 1085 (2002).
2. Кейси Х., Паниш М. *Лазеры на гетероструктурах* (М.: Мир, 1981, т. 1, с. 299–364).
3. Wang J., Yuan Z., Kang L., Yang K., Zhang Y., Liu X. *Proc. 59th Electronic Components and Technology Conference* (2009, с. 837).
4. Brauch U., Loosen P., Opower H. *Topics Appl. Phys.*, **78**, 303 (2000).
5. Стрельченко С.С., Лебедев В.В. *Соединения A^{III}B^V*: Справочник (М.: Металлургия, 1984, с. 144)
6. Боуэн Д.К., Таннер Б.К. *Высокоразрешающая рентгеновская дифрактометрия и топография* (СПб.: Наука, 2002, с. 274).
7. Brunner F., Knauer A., Schenk T., Weyers M., Zettler J.-T. *J. Cryst. Growth.*, **310**, 2432 (2008).