

Одномодовые лазеры с гребневидным элементом, сформированные в источнике трансформаторно-связанной плазмы

Е.И.Давыдова, А.В.Зубанов, А.А.Мармалюк, М.Б.Успенский, В.А.Шишкин

Изучены параметры лазерных диодов ($\lambda = 0.98$ мкм) с узким гребневидным волноводом, сформированных низкоэнергетическим ионно-химическим травлением с использованием источника трансформаторно-связанной плазмы. Статистически показано, что при соответствии геометрических размеров гребневидного волновода результатам расчётов выход годных диодов с мощностью излучения 150–200 мВт может достигать 78%. Установлено существенное влияние оптических свойств волновода в перпендикулярном направлении на выход диодов с заданным уровнем мощности. При использовании обычных оптических покрытий $\text{SiO}_2 - \text{ZrO}_2$ предельная мощность в одномодовом режиме (220–230 мВт) ограничивалась деградацией зеркальных граней.

Ключевые слова: лазерные диоды, активный элемент, гребневидный волновод, источник трансформаторно-связанной плазмы.

1. Введение

Растущие требования к мощности и долговечности одномодовых лазеров требуют непрерывного совершенствования их конструкции и технологии изготовления. Одним из наиболее важных этапов изготовления широко используемых лазеров с гребневидным волноводом является ионно-химическое травление (ИХТ) гребня. Этот процесс определяет форму и ширину гребня, а также требуемую для эффективного бокового оптического ограничения глубину травления верхнего эмиттерного слоя. Не менее важна и минимизация радиационных дефектов, возникающих в приповерхностных слоях при ионной обработке. В предыдущих работах [1, 2] описаны результаты исследований формирования узких гребнёвых ИХТ-структур в случае использования источника трансформаторно-связанной плазмы (ТСП) [3] при энергии частиц ~ 150 эВ. Зарегистрированный в [2] низкий уровень дефектообразования позволяет прогнозировать возможность практического исключения процесса ИХТ из факторов, ограничивающих долговечность приборов. Вместе с тем форма гребня несколько отличается от формы, образующейся при травлении с энергией ~ 350 эВ в диодной ВЧ системе, с использованием которой была получена мощность непрерывного лазерного излучения $P_{\text{св}} = 200$ мВт при хорошем качестве лазерного пучка [4].

В связи с этим представляла теоретический и практический интерес проверка совпадения энергетических и оптических параметров гребнёвых лазеров с «низкоэнергетичной» формой гребня при использовании расчётных значений ширины гребня W и остаточной толщины эмиттерного слоя Δh по модели [4].

2. Постановка эксперимента

Для изготовления лазерных диодов использовались три эпитаксиальные структуры с двумя квантоворазмерными слоями, изготовленные методом МОС-гидридной эпитаксии, с несколько различающимся составом эмиттерных и волноводных слоёв (табл.1). Длина волны всех лазеров была близка к 0.98 мкм; конструкция гребнёвого лазера показана на рис.1.

Формирование гребней осуществлялось в модифицированной установке ионно-химического травления «ЭРА-2М» с источником ТСП. При изготовлении активного элемента с гребневидным волноводом использовались данные расчётов [4], выполненных для эпитаксиальной структуры, характеристики которой были близки к данной структуре I (табл.1). Из расчётов следует, что для получения рекомендуемого в работе [5] значения эффективного показателя преломления $\Delta n \approx 6 \times 10^{-3}$ остаточная толщина эмиттерного слоя Δh должна составлять ~ 0.4 мкм.

При анализе приведённых данных было отмечено, что, несмотря на несколько большее усиление нулевой моды с ростом W , возрастает вероятность возбуждения первой моды при малейшем отклонении от заданных параметров Δh и W изготавливаемых лазерных элементов (табл.2).

Табл.1. Основные параметры эпитаксиальных структур (d – толщина слоя, x_{Al} – содержание Al в $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$).

Номер структуры	Эпитаксиальная структура			
	Волноводный слой		p -эмиттерный слой	
	d (мкм)	x_{Al} (%)	d (мкм)	x_{Al} (%)
I	0.3	26	1.5	32
	0.3	26	1.5	32
II	0.3	30	1.5	40
	0.3	30	1.5	40
III	0.3	30	1.67	38
	0.3	30	1.67	38

Е.И.Давыдова, А.В.Зубанов, А.А.Мармалюк, М.Б.Успенский, В.А.Шишкин. ФГУП «НИИ "Полус" им. М.Ф.Степеля», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3; e-mail: azubanov@mail.ru

Поступила в редакцию 16 апреля 2004 г.

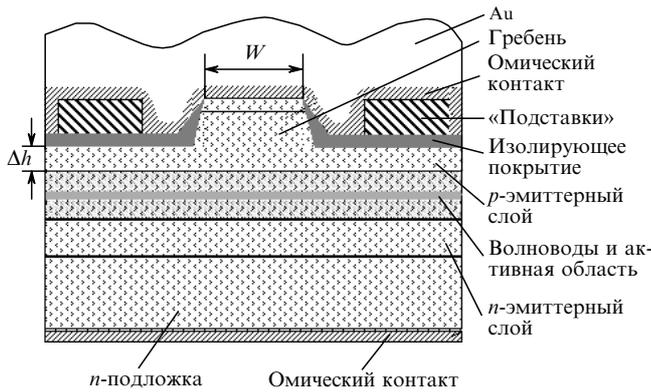


Рис.1. Схема лазера с гребневидным волноводом (W – ширина гребня; Δh – остаточная толщина эмиттера).

В соответствии с обнаруженным ранее эффектом компенсации механических напряжений [1] суммарная толщина изолирующего покрытия ZnSe, p -контакта и слоя гальванического золота выбиралась с учётом минимизации механических напряжений. Структура уточнялась со стороны n -подложки до ~ 100 мкм и на неё напылялась плёнка омического n -контакта.

Изготовленные пластины с активными элементами разделялись на полоски с длиной резонатора $L_{\text{cav}} = 800$ и 1000 мкм, после чего на торцы наносились отражающие покрытия.

При выборе коэффициентов отражения R_1 и R_2 оптических покрытий мы преимущественно руководствовались данными, приведёнными в работе [6], согласно которым просветление выходного зеркала до $R_1 = 3\% - 5\%$ увеличивает предельную мощность излучения лазера в одномодовом режиме. Исследовались также лазеры и с другими значениями R_1 (коэффициенты отражения приведены в табл.2).

После разделения полосок на лазерные элементы они напаялись на медный теплоотвод с помощью индийевого припоя.

В отличие от [4] нами для оценки совпадения расчётных данных и экспериментальных результатов использовался статистический метод. Из каждой из трех эпитаксиальных структур изготавливалось по 30 лазеров, которые выбирались из разных полосок и сборочных партий. Статистический метод позволял оценить уровень технологии с учётом точности измерений и разнотолщинности стравливаемых слоёв, а также неоднородность скорости травления в зоне обработки.

Все измерения излучательных характеристик производились в тест-корпусах с прижимными электрическими контактами. После предварительного отбора годных образцов (не имеющих дефектов пайки, сборки и т.п.)

Табл.2. Основные параметры лазерных диодов.

Номер пластины	Лазер			
	W (мкм)	Δh (мкм)	L_{cav} (мкм)	R_1/R_2
Ia	4	0.4	800	3/97
Iб	4	0.4	800	5/97
IIa	4	0.4	800	8/97
IIб	3	0.4	1000	3/97
IIIa	3	0.4	1000	1/97
IIIб	3	0.3	1000	1/97

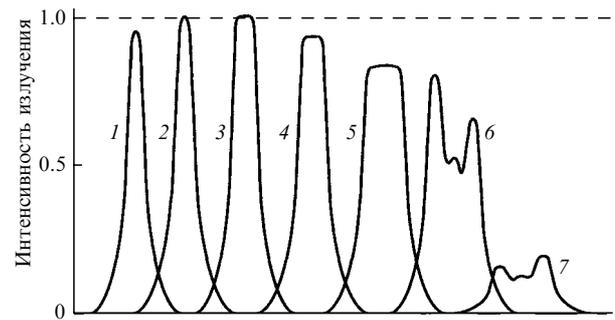


Рис.2. Изменение диаграммы угловой расходимости в дальней зоне при повторных циклах измерений, обусловленное деградацией выходного зеркала лазера; ток накачки $I = 215$ мА (1), 230 мА ($P \sim 200$ мВт) (2), 240 мА (1 цикл измерений) (3), 240 мА (3 цикла) (4), 240 мА (5 циклов) (5), 240 мА (6 циклов) (6), 240 мА (8 циклов, $P \sim 30 - 40$ мВт) (7).

осуществлялся 100 %-ный контроль лазерных ватт-амперных (ВтАХ), и вольт-амперных (ВАХ) характеристик, а также диаграмм угловой расходимости Θ_{\parallel} в плоскости, параллельной $p-n$ -переходу в диапазоне мощности 30 – 200 мВт. Контроль угловой расходимости в перпендикулярной $p-n$ -переходу плоскости Θ_{\perp} осуществлялся выборочно для 20 % – 25 % лазеров, собранных из каждой эпитаксиальной структуры. Измерение параметров производилось при токе накачки от нуля до 250 мА.

При контроле параметров приборов однододовыми считались только лазеры, удовлетворяющие следующим условиям:

- диаграмма излучения в дальней зоне должна соответствовать режиму рефрактивного ограничения (основной вклад в формирование сильного волновода вносит скачок эффективного показателя преломления) – рис.2, кривая 2, либо режиму диссипативного ограничения, определяемому усилением (здесь имеет место усиление в центральной части и поглощение на краях), – рис.2, кривая 3. Именно в области, где имеет место только приближение к режиму оптического ограничения за счёт показателя преломления, лазерные диоды работают наиболее эффективно [7];

- максимум диаграммы излучения не отклоняется от вертикальной оси во всём диапазоне измерений;

- расширение расходимости излучения $\Theta_{\parallel}^{0.5}$ по уровню 0.5 не более $2 - 30^\circ$ во всём диапазоне измерений.

Предельная мощность лазеров ($P = 200$ мВт), как правило, была обусловлена оптической деградацией зеркал (в процессе эксперимента более 10 лазерных диодов «сгорели» при мощности $P \sim 210 - 230$ мВт во время записи характеристик).

В отличие от испытаний в импульсном режиме, когда происходит внезапный тепловой взрыв [4], в наших экспериментах удалось отследить постепенное, от цикла к циклу, изменение диаграммы угловой расходимости Θ_{\parallel} (см. рис.2).

Анализируя диаграмму, можно отметить, что вначале, с ростом тока накачки I , прекращается увеличение амплитуды (кривая 2 на рис 2). Далее диаграмма расширяется (кривая 4), её вершина уплощается (кривая 5) и, наконец, происходит гашение нулевой моды и возбуждение высших мод (кривая 6). Процесс деградации завершается резким спадом мощности.

В табл.3 представлены доля лазеров (%), способных работать в режиме одномодовой генерации для трёх уровней мощности (100, 150 и 200 мВт), угловая расхо-

Табл.3. Основные характеристики лазеров, изготовленных из структур, приведенных в табл.1.

Номер структуры	Доля одномодовых лазеров (%) при мощности			$\langle \eta_d \rangle$ (Вт/А)*	R_{ser} (Ом)	$\theta_{ }^{0.5}$ (град.)**	$\theta_{\perp}^{0.5}$ (град.)
	$P = 100$ мВт	$P = 150$ мВт	$P = 200$ мВт				
I	92.8	78.5	35.7	1.0	2.3	6–8.5	28–30
II	84.4	52	12	0.96	2.9	7.5–12.5	31–32
III	62.5	41.7	8	1.08	3.3	9–13	33–34

* $\langle \eta_d \rangle$ измерены в диапазоне мощностей 10–200 мВт; ** $\theta_{||}^{0.5}$ измерены в диапазоне мощностей 150–200 мВт.

димось излучения в плоскости $p-n$ -перехода на уровне 0.5 ($\theta_{||}^{0.5}$) при мощности одномодовой генерации 150–200 мВт и другие характеристики эпитаксиальных структур и лазеров.

Анализ приведённых результатов позволяет сделать следующие выводы: рассматриваемый технологический комплекс обеспечивает изготовление лазерных диодов с мощностью в одномодовом режиме $P = 150 - 200$ мВт с приемлемой производительностью. Несмотря на различие в вариантах сборки (гребнем вниз или вверх) и некоторый разброс значений Δh (0.3–0.4 мкм), W (3–4 мкм) и R_1 (1%–8%), отчётливо выявляется определяющее влияние исходной эпитаксиальной структуры.

Наилучшие результаты демонстрируют лазеры, изготовленные из структуры I (при мощности $P = 200$ мВт в одномодовом режиме способны устойчиво работать 35% образцов), в то время как для лазеров, изготовленных из структур II и III, этот показатель равен 12% и 8% соответственно (рис.3). Данное обстоятельство можно объяснить, в первую очередь, тем, что структура I наиболее близка по конструкции и составу слоёв к расчётной. Важно отметить, что она также имеет наименьшую из всех рассмотренных структур угловую расходимость $\theta_{\perp}^{0.5}$ (28–30°). С одной стороны, это свидетельствует о расширении области излучения в перпендикулярном направлении и, как следствие, о повышении порога катастрофической деградации зеркала. С другой стороны, это обеспечивает лучшее боковое оптическое ограничение за счёт большего проникновения поля в слой p -эмиттера. Кроме того, реальный профиль легирования, по-видимому, близок к оптимальному, поскольку обеспечивает как минимальное последовательное сопротивление ($R_{ser} = 2.3$ Ом), так и слабое снижение дифференциальной квантовой эффективности η_d в диапазоне мощностей 150–200 мВт. Следствием этого является высокое качество оптического излучения лазеров первой группы, изготовленных из структуры I.

На рис.4,а представлена диаграмма излучения в плоскости $p-n$ -перехода для типичного лазера при мощности 200 мВт. Угловая расходимость диаграммы излучения $\theta_{||}^{0.5} = 7^\circ$. Характер излучения данного образца по-

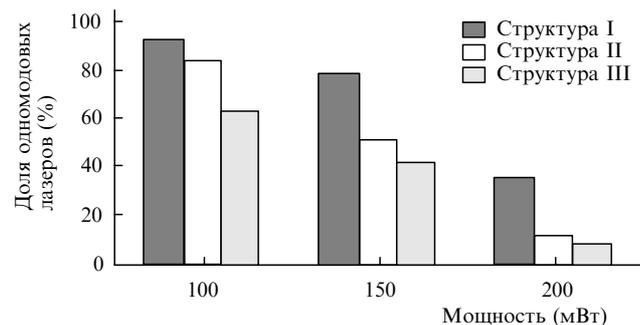


Рис.3. Доля лазеров из различных структур, работающих в одномодовом режиме генерации при разной мощности излучения.

казывает наличие режима бокового оптического ограничения, соответствующего в расчётной модели рефрактивному типу. Основной вклад в формирование оптического волновода вносит скачок эффективного показателя преломления, а сжатие боковых мод приводит к некоторому снижению дифференциальной квантовой эффективности. В данном случае мощность излучения около 200 мВт достигается при токе 230 мА. Важно подчеркнуть, что одномодовый режим излучения сохранялся в диапазоне мощностей 1–200 мВт.

Лазеры второй группы демонстрировали в одномодовом режиме такую же форму диаграммы излучения до уровня мощности $P = 150 - 180$ мВт. Дальнейший рост мощности приводил к увеличению $\theta_{||}^{0.5}$ до 9–11.5° или к смещению оси диаграммы, которое является наиболее частым признаком отклонения от одномодового режима генерации при увеличении выходной мощности. У некоторых лазеров оно проявляется начиная с $P \geq 100 - 120$ мВт.

Результаты измерений для лазеров, собранных из структур II и особенно III, существенно отличаются от описанных выше, причём, с точки зрения одномодового режима, в худшую сторону. Это проявляется как в заметном уменьшении доли одномодовых лазеров, способных излучать мощность $P = 200$ мВт, так и в увеличении угла $\theta_{||}^{0.5}$ до 8.5–13°.

Как правило, лазеры этих групп при мощности до 100 мВт имеют диаграммы излучения, соответствующие рефрактивному типу оптического ограничения с постепенным переходом к диссипативному типу. Примеры диаграмм такого вида представлены на рис.4,б. Изменение формы диаграмм можно объяснить уменьшением боко-

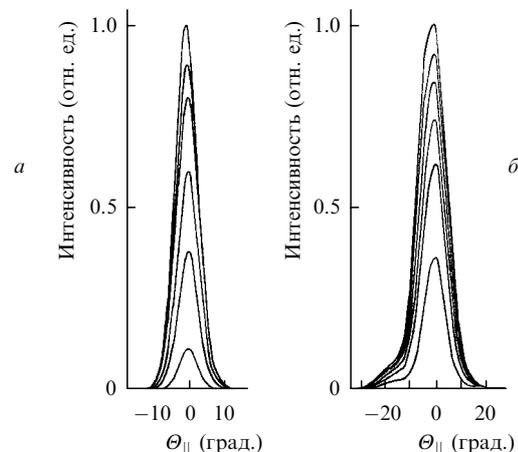


Рис.4. Угловое распределение интенсивности в дальней зоне в плоскости $p-n$ -перехода для лазерных диодов при разных токах накачки в режиме бокового оптического ограничения, соответствующем рефрактивному типу (а), и в режиме диссипативного ограничения бокового оптического ограничения при мощности излучения более 100 мВт (б); максимальная амплитуда соответствует мощности излучения 200 мВт.

вого скачка показателя преломления по сравнению с профилем n лазеров, изготовленных из структуры I, по мере уменьшения глубины проникновения оптического поля в верхний эмиттерный слой. В определённой степени диаграмму излучения удалось улучшить, увеличив боковое оптическое ограничение ($\Delta h = 0.3$ мкм) и уменьшив усиление первой моды ($W = 3$ мкм). Именно на эту пластину (ПБ в табл.2) приходится основная доля лазеров с мощностью одномодового излучения $P > 150$ мВт при расходимости в вертикальной плоскости $\Theta_{\perp}^{0.5} = 33 - 34^{\circ}$. Несколько лазеров этой группы достигли мощности ~ 200 мВт. Однако в целом результаты для лазеров из пластины ПБ заметно хуже, чем для лазеров из пластин структуры I.

3. Заключение

Показано, что использование в технологии изготовления одномодовых лазеров низкоэнергетичного (~ 150 эВ) ионно-химического травления в ТСП-источнике способно обеспечить на столике диаметром $D > 150$ мм (при правильном выборе эпитаксиальной структуры и соответствующих значениях W и Δh) изготовление одномодовых лазеров с $P = 150 - 200$ мВт в непрерывном режиме. Выход годных лазеров соответствует их серийному выпуску.

Подтверждена применимость расчётной модели гребневидного волновода прямоугольного профиля для формируемого при низкоэнергетичном ИХТ гребня трапециевидной формы (85°). Вместе с тем при одинаковой остаточной толщине эмиттерного слоя $\Delta h \approx 0.3 - 0.4$

мкм выявлено ощутимое преимущество в мощности одномодового излучения структур с меньшей угловой расходимостью в перпендикулярном направлении.

Достигнутая в одномодовом режиме генерации мощность $P = 200 - 220$ мВт для структуры I является, по-видимому, предельной при угловой расходимости излучения $\Theta_{\perp}^{0.5} \geq 28^{\circ}$ и непассивированных зеркалах.

Разумеется, фактические результаты во многом зависят от обеспечения эффективного теплоотвода при сборке лазеров, от качества оптических покрытий на зеркалах, последовательного электрического сопротивления диода и ряда других факторов.

Авторы выражают благодарность Е.В.Берлину (ЗАО НПП «Тирс», Зеленоград) за помощь в освоении источника ТСП).

1. Зубанов А.В., Павлов В.Ф., Успенский М.Б., Шишкин В.А. *Лазерные новости* (М.: изд-е ЦНИИ «Электроника», № 1–2, 2002, с.69).
2. Зубанов А.В., Мармалюк А.А., Успенский М.Б., Шишкин В.А. *Лазерные новости* (М.: изд-е ЦНИИ «Электроника», № 1–2, 2002, с.65).
3. Horst S.C., Agarwala S., King O. *Appl. Phys. Lett.*, **71** (11), 1444 (1997).
4. Поповичев В.В., Давыдова Е.И., Мармалюк А.А., Симаков А.В., Успенский М.Б., Чельный А.А., Богатов А.П., Дракин Е.А., Плисюк С.А., Стратонников А.А. *Квантовая электроника*, **32** (12), 1099 (2002).
5. Давыдова Е.И., Дракин А.Е., Елисеев П.Г. *Квантовая электроника*, **19** (10), 1024 (1992).
6. Govind P.Agrawal. *J. Lightwave Techn.*, **LT-2** (4), 537 (1984).
7. Елисеев П.Г. *Квантовая электроника*, **32** (12), 1085 (2002).