

Исследование эпитаксиально-интегрированных туннельно-связанных полупроводниковых лазеров, выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии

© Д.А. Винокуров[¶], В.П. Коняев*, М.А. Ладугин*, А.В. Лютецкий, А.А. Мармалюк*, А.А. Падалица*, А.Н. Петрунов, Н.А. Пихтин, В.А. Симаков*, С.О. Слипченко, А.В. Сухарев*, Н.В. Фетисова, В.В. Шамахов, И.С. Тарасов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

* ФГУП НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха,
117342 Москва, Россия

(Получена 30 июля 2009 г. Принята к печати 20 августа 2009 г.)

Выбраны параметры конструкции эпитаксиально-интегрированных туннельно-связанных асимметричных лазерных гетероструктур раздельного ограничения. Определены технологические режимы изготовления таких гетероструктур методом МОС-гидридной эпитаксии в системе твердых растворов AlGaAs/GaAs/InGaAs. Показана возможность изготовления в одном технологическом процессе высокоэффективных туннельных структур GaAs:Si/GaAs:C и асимметричных лазерных гетероструктур AlGaAs/GaAs/InGaAs с малыми внутренними оптическими потерями. Выбраны условия формирования глубокой мезы для изготовления мезаполосковых многомодовых лазеров на основе эпитаксиально-интегрированных туннельно-связанных лазерных гетероструктур. На основе таких структур изготовлены мезаполосковые лазеры с апертурой 150×12 мкм. В образцах достигнуты значения плотности порогового тока $J_{th} = 96 \text{ А/см}^2$, внутренние оптические потери $\alpha_i = 0.82 \text{ см}^{-1}$ и дифференциальное сопротивление $R = 280 \text{ мОм}$. В импульсном режиме генерации (100 нс, 1 кГц) в образцах, содержащих три лазерные структуры, получен наклон ватт-амперной характеристики 3 Вт/А и максимальная мощность 250 Вт.

1. Введение

Работа является продолжением исследований [1–3], направленных на создание мощных импульсных полупроводниковых источников излучения. Как уже отмечалось ранее, одним из способов повышения оптической мощности полупроводниковых лазеров является создание источников излучения на основе эпитаксиально-интегрированных туннельно-связанных лазерных гетероструктур [4–8]. В работе [3] нами были определены технологические режимы для создания туннельных $p-n$ -переходов GaAs:Si/GaAs:C, выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии. Эпитаксиально-интегрированная туннельно-связанная лазерная структура представляет собой набор из N лазерных гетероструктур, последовательно выращенных в одном технологическом процессе и связанных туннельными переходами. Цель данной работы состояла в выборе технологических условий МОС-гидридной эпитаксии для получения эпитаксиально-интегрированных туннельно-связанных лазерных гетероструктур в системе твердых растворов AlGaAs/GaAs/InGaAs и создания мезаполосковых лазеров на их основе.

Для реализации поставленной цели решались следующие задачи: совмещение в едином технологическом процессе получения высокоэффективного туннельного $p-n$ -перехода и асимметричной гетероструктуры раздельного ограничения с расширенным волноводом. Вторая задача состояла в разработке технологии создания глубокой

мезаполосковой конструкции активного элемента, состоящего из двух и трех эпитаксиально-интегрированных туннельно-связанных лазерных структур.

2. Выбор конструкции эпитаксиально-интегрированной туннельно-связанной лазерной гетероструктуры

Согласно концепции мощных полупроводниковых лазеров, основой для мощных непрерывных и импульсных полупроводниковых лазеров является асимметричная гетероструктура раздельного ограничения с расширенным волноводом [9–11]. Внутренние оптические потери в лазерной структуре раздельного ограничения состоят из суммы потерь в активной области, волноводных и эмиттерных слоях. Поэтому уровень легирования эмиттерных слоев выбирается из условий сохранения эффективной инжекции носителей заряда обоих знаков и минимального уровня потерь на рассеяние на свободных носителях заряда в эмиттерных слоях, как наиболее сильно легированных. В эпитаксиально-интегрированных туннельно-связанных лазерных структурах между эмиттерами последовательно связанных структур помещается туннельный $p-n$ -переход. В [3] было показано, что для получения высокоэффективного $p-n$ -перехода необходимо легирование слоев GaAs акцепторной и донорной примесью до уровня $(8-9) \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Использование в качестве легирующих акцепторной (С)

[¶] E-mail: dmitry.vinokurov@mail.ioffe.ru

и донорной (Si) примесей позволяет получить резкий $p-n$ -переход из-за малого диффузионного размытия профилей обеих легирующих примесей. Из общих соображений толщина эпитаксиально-интегрированной туннельно-связанной лазерной структуры должна быть минимизирована для оптимального проведения постростовых операций по формированию мезаполосковой структуры активного элемента. В эпитаксиально-интегрированной туннельно-связанной лазерной гетероструктуре можно варьировать толщину эмиттеров, поскольку толщина волновода асимметричной структуры разделенного ограничения задана согласно данным [9–11]. Расчет толщины эмиттерных слоев был проведен исходя из условия непревышения внутренних оптических потерь в эмиттерах эпитаксиально-интегрированной туннельно-связанной лазерной структуры более 5% за счет распространения излучения по слоям, образующим туннельный $p-n$ -переход. Схематическое изображение энергетической зонной структуры и распределения электромагнитного излучения в волноводах лазерных структур приведено на рис. 1. В таблице приведены толщины, составы и уровни легирования эпитаксиально-интегрированной туннельно-связанной лазерной структуры с двумя туннельными $p-n$ -переходами.

3. Экспериментальные образцы мезаполосковых лазеров на основе эпитаксиально-интегрированных туннельно-связанных лазерных структур с одним и двумя туннельными $p-n$ -переходами

Методом МОС-гидридной эпитаксии были изготовлены эпитаксиально-интегрированные туннельно-связанные лазерные структуры с одним (тип А) и двумя (тип В) туннельными $p-n$ -переходами. На рис. 2 приведена фотография скола эпитаксиально-интегрированной туннельно-связанной лазерной гетероструктуры, состоящей из трех асимметричных лазерных структур разделенного ограничения (тип В). Общая толщина эпитаксиально-интегрированных туннельно-связанных лазерных структур типа А и типа В составляет 11 и 16 мкм соответственно. Увеличение общей толщины лазерных структур вносит дополнительные требования к поддержанию постоянства условий технологического процесса. Лазерные структуры изготавливались с применением легирующих примесей магния и кремния по отработанной в [12] технологии. Туннельные $p-n$ -переходы, связывающие лазерные структуры, изготавливались с использованием слабо диффундирующих легирующих примесей углерода и кремния по технологическому маршруту, отработанному в [3].

Изготовление активных лазерных элементов из эпитаксиально-интегрированных туннельно-связанных лазерных структур проводилось по отработанному марш-

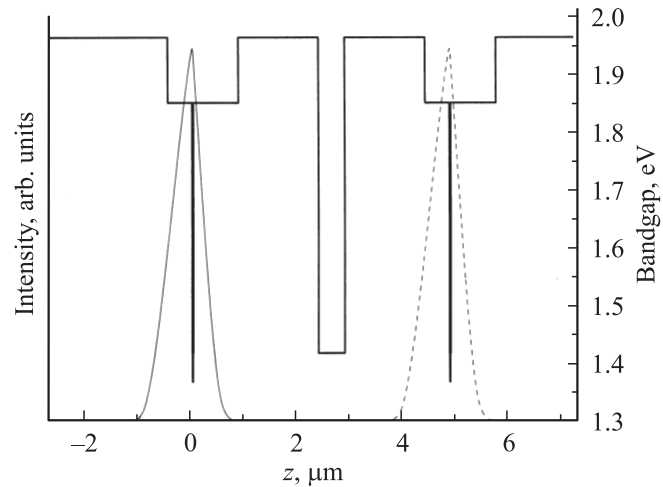


Рис. 1. Схематическое изображение энергетической зонной структуры эпитаксиально-интегрированной туннельно-связанной лазерной гетероструктуры и распределение электромагнитного излучения в волноводах лазерной структуры.

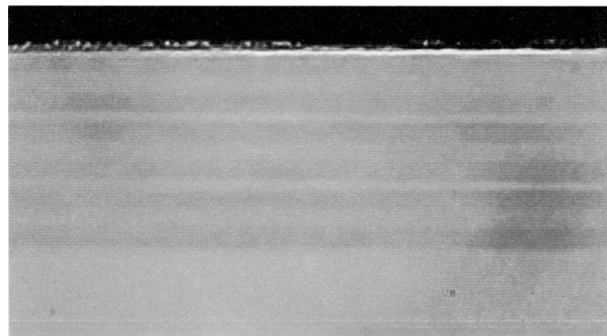


Рис. 2. Фотография скола эпитаксиально-интегрированной туннельно-связанной лазерной гетероструктуры, состоящей из 3 асимметричных лазерных структур разделенного ограничения (тип В).

риту изготовления многомодовых мезаполосковых лазеров с излучающей апертурой ~ 150 мкм [12]. Для обеспечения полного токового ограничения во всех последовательных лазерных структурах ограничивающие волноводы активного лазерного элемента мезы протравливались на глубину двух (тип А) и трех (тип В) лазерных структур. Меза формировалась трапециевидной формы для равномерного и полного удаления продуктов травления и технологичности последующих постростовых операций. На рис. 3 приведена фотография активного лазерного элемента, изготовленного из эпитаксиально-интегрированной туннельно-связанной лазерной структуры типа В. Электрическая изоляция достигалась нанесением двуокиси кремния, после чего наносился омический контакт Zn/Au и усиливающий слой Au на всю поверхность контактного p^+ -слоя. Для полной электрической изоляции слой двуокиси крем-

Эпитаксиально-интегрированная туннельно-связанная лазерная структура с двумя туннельными $p-n$ -переходами

№	Слой	Состав	Легирование, см^{-3}	Толщина
1	n -подложка	GaAs (100)	$n: 3 \cdot 10^{18}$	350 мкм
2	n -эмиттер	$\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$	$n: 10^{18}(\text{Si})$	1.8 мкм
3	Волновод	$\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$	Нелегирован	0.85 мкм
4	Спейсер	GaAs	»	7 нм
5	Активная область (КЯ)	$\text{Ga}_{0.94}\text{In}_{0.06}\text{As}$	»	10 нм
6	Спейсер	GaAs	»	7 нм
7	Волновод	$\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$	»	0.45 мкм
8	p -эмиттер	$\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$	$p: 10^{18}(\text{C})$	1.54 мкм
9	Туннельный P^+ -слой	GaAs	$p: 2 \cdot 10^{20}(\text{C})$	0.12 мкм
10	Туннельный N^+ -слой	GaAs	$n: 2 \cdot 10^{20}(\text{Si})$	0.12 мкм
11	n -эмиттер	$\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$	$n: 10^{18}(\text{Si})$	1.54 мкм
12	Волновод	$\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$	Нелегирован	0.85 мкм
13	Спейсер	GaAs	»	7 нм
14	Активная область (КЯ)	$\text{Ga}_{0.94}\text{In}_{0.06}\text{As}$	»	10 нм
15	Спейсер	GaAs	»	7 нм
16	Волновод	$\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$	»	0.45 мкм
17	p -эмиттер	$\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$	$p: 10^{18}(\text{C})$	1.54 мкм
18	Туннельный P^+ -слой	GaAs	$p: 2 \cdot 10^{20}(\text{C})$	0.12 мкм
19	Туннельный N^+ -слой	GaAs	$n: 2 \cdot 10^{20}(\text{Si})$	0.12 мкм
20	n -эмиттер	$\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$	$n: 10^{18}(\text{Si})$	1.54 мкм
21	Волновод	$\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$	Нелегирован	0.85 мкм
22	Спейсер	GaAs	»	7 нм
23	Активная область (КЯ)	$\text{Ga}_{0.94}\text{In}_{0.06}\text{As}$	»	10 нм
24	Спейсер	GaAs	»	7 нм
25	Волновод	$\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$	»	0.45 мкм
26	p -эмиттер	$\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$	$p: 10^{18}(\text{C})$	1.5 мкм
27	Контактный p -слой	GaAs	$p: 10^{18}(\text{C})$	0.5 мкм

ния наносился толщиной не менее 0.2 мкм. На торцы резонатора Фабри–Перо наносились зеркала и просветляющие покрытия после предварительного травления и нитридации поверхности скола. Активные лазерные элементы из структур типа А и В монтировались на медные теплоотводы и готовились для исследования излучательных характеристик.

4. Исследование излучательных характеристик мезаполосковых лазеров на основе эпитаксиально-интегрированных туннельно-связанных лазерных структур с одним и двумя туннельными $p-n$ -переходами

Для характеристики полупроводниковых лазеров на основе эпитаксиально-интегрированных туннельно-связанных лазерных структур типа А и В были построены зависимости пороговой плотности тока и величины обратной дифференциальной квантовой эффективности от длины резонатора лазера, что позволило определить внутренние потери и пороговую плотность тока для лазера с бесконечной длиной резонатора. Все измерения проводились в импульсном режиме с длительностью токовых импульсов 100 нс и частотой повторения 1 кГц. Пороговая плотность тока для лазеров на основе структуры типа В составляла 96 А/см^2 , что практически не отличалось от пороговой плотности тока для лучших образцов одиночных лазеров, излучающих на длинах волн 905 нм. Это свидетельствовало о высокой степени изоляции по току двуокисью кремния мезаполосковой конструкции активного лазер-

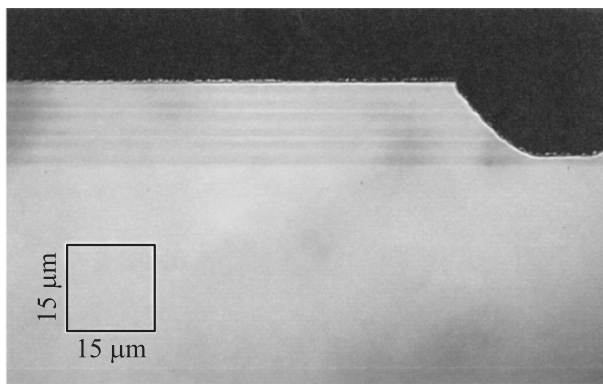


Рис. 3. Фотография скола резонатора Фабри–Перо мезаполоскового лазера с 3 асимметричными лазерными гетероструктурами раздельного ограничения, соединенными последовательно туннельными $p-n$ -переходами (тип В).

ного элемента и воспроизводимостью технологического процесса изготовления эпитаксиально-интегрированных туннельно-связанных лазерных структур. Величина стимулированного квантового выхода для эпитаксиально-интегрированных туннельно-связанных лазерных структур достигала $\eta_i \approx 100\%$, что соответствовало лучшим значениям η_i для одиночных структур. Наибольший интерес представляло значение внутренних оптических потерь для эпитаксиально-интегрированных туннельно-связанных лазерных структур. Внутренние оптические потери также соответствовали значениям для лучших одиночных лазерных структур и составляли 0.82 см^{-1} , что свидетельствовало о правильном выборе конструкции эпитаксиально-интегрированных туннельно-связанных лазерных гетероструктур.

На рис. 4 приведены ватт-амперные характеристики для мезаполосковых лазеров, изготовленных на основе эпитаксиально-интегрированных туннельно-связанных лазерных структур типа А и В. Характерным для исследуемых лазерных структур является увеличение наклона ватт-амперной характеристики в два (структура типа А) и три (структура типа В) раза по сравнению с одиночными лазерными структурами. В лазерных структурах типа А наклон ватт-амперной характеристики составлял 2 Вт/А , а в структурах типа В — 3 Вт/А . Необходимо учесть, что апертура в мезаполосковых лазерах на основе структур типа А составляет $150 \times 7 \text{ мкм}$ и на основе структур типа В $150 \times 12 \text{ мкм}$ по сравнению с $150 \times 2 \text{ мкм}$ для одиночных лазерных структур. Мезаполосковые лазеры на основе структур обоих типов не достигали порога генерации в непрерывном режиме, что свидетельствовало о высокой температурной чувствительности изготовленных мезаполосковых лазеров. В импульсном режиме генерации наблюдалось слабое отклонение от линейности ватт-амперных характеристик для обоих типов структур до токов накачки $80\text{--}100 \text{ А}$.

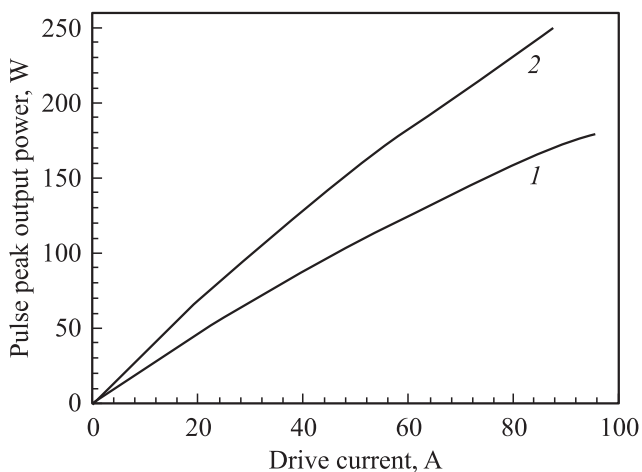


Рис. 4. Ватт-амперные характеристики мезаполосковых лазеров на основе эпитаксиально-интегрированных туннельно-связанных лазерных структур: 1 — с одним (тип А) и 2 — двумя (тип В) туннельными p - n -переходами.

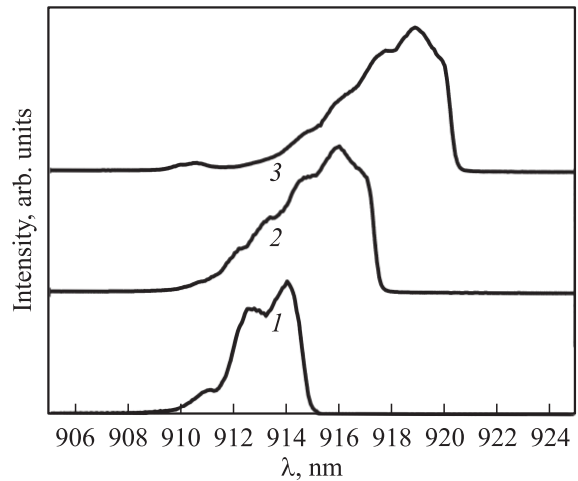


Рис. 5. Зависимости спектров излучения от тока накачки мезаполосковых лазеров на основе эпитаксиально-интегрированных туннельно-связанных структур с двумя туннельными p - n -переходами (тип В). Ток накачки I , А: 1 — 2, 2 — 22, 3 — 47.

Последовательное сопротивление лазеров мезаполосковой конструкции на основе структур типа А и В при длине резонатора $3\text{--}4 \text{ мм}$ составляло величину 240 и 280 МОм соответственно, что позволяет связать высокую температурную чувствительность полупроводниковых лазеров с сильным удалением теплоотвода.

На рис. 5 представлены интегральные спектральные характеристики мезаполосковых эпитаксиально-интегрированных туннельно-связанных полупроводниковых лазеров типа В. Наблюдается некоторое расширение спектров излучения, особенно при высоких уровнях токовой накачки, что, по нашему мнению, связано с различием температур активных областей эпитаксиально-интегрированных туннельно-связанных лазерных структур.

В картине дальнего поля исследуемых лазеров не наблюдалось каких-либо отличий от лазеров, состоящих из одной лазерной структуры, поскольку они полностью определяются размерами излучающих поверхностей, образующих волноводы, и показателями преломления полупроводниковых материалов их формирующих. Расходимость излучения составляла 15 и 32° в параллельной и перпендикулярной плоскостях соответственно.

5. Заключение

В результате выполнения работы показана возможность совместить изготовление асимметричных лазерных гетероструктур раздельного ограничения и высокоэффективных туннельных p - n -переходов в одном технологическом процессе МОС-гидридной эпитаксии в системе твердых растворов $\text{AlGaAs/GaAs/InGaAs}$. Продемонстрирована возможность выполнения положений

концепции мощных полупроводниковых лазеров в лазерных структурах, последовательно соединенных сильно легированными слоями туннельного $p-n$ -перехода, что выражается в достижении величины 0.82 см^{-1} внутренних оптических потерь на рассеяние. Выбраны условия формирования глубокой мезы для обеспечения полной электрической изоляции нескольких лазерных и туннельных $p-n$ -переходов при изготовлении мезаполосковых лазеров на основе эпитаксиально-интегрированных туннельно-связанных лазерных гетероструктур. Показано, что внедрение в эпитаксиально-интегрированную туннельно-связанную структуру двух высокоэффективных туннельных $p-n$ -переходов GaAs:Si/GaAs:C позволяет достичь в мезаполосковом лазере последовательно дифференциального сопротивления $R = 280 \text{ мОм}$.

Последовательное соединение с помощью туннельных $p-n$ -переходов трех лазерных гетероструктур позволяет увеличить в 3 раза наклон ватт-амперной характеристики по сравнению с одиночным лазером, что в импульсном режиме генерации (100 нс, 1 кГц) позволяет довести его значение до 3 Вт/А. Максимальная мощность излучения при этом достигала 250 Вт.

Работа выполнена при поддержке государственного контракта № 02.513.12.3011.

Список литературы

- [1] Д.А. Винокуров, В.А. Капитонов, А.В. Лютецкий, Н.А. Пихтин, С.О. Слипченко, З.Н. Соколова, А.Л. Станкевич, М.А. Хомылёв, К.С. Борщёв, И.Н. Арсентьев, И.С. Тарасов. ФТП, **41** (8), 1003 (2007).
- [2] Д.А. Винокуров, В.А. Капитонов, А.В. Лютецкий, Д.Н. Николаев, Н.А. Пихтин, А.В. Рожков, Н.А. Рудова, С.О. Слипченко, А.Л. Станкевич, Н.В. Фетисова, М.А. Хомылёв, В.В. Шамахов, К.С. Борщёв, И.С. Тарасов. Письма ЖТФ, **32** (16), 47 (2006).
- [3] Д.А. Винокуров, М.А. Ладугин, А.А. Мармалюк, А.А. Падалица, Н.А. Пихтин, В.А. Симаков, А.В. Сухарев, Н.В. Фетисова, В.В. Шамахов, И.С. Тарасов. ФТП, **43** (9), 1253 (2009).
- [4] J.P. van der Ziel, W.T. Tsang. Appl. Phys. Lett., **41** (6), 499 (1982).
- [5] J.Ch. Garcia, E. Rosencher, Ph. Collot, N. Laurent, J.L. Guyaux, B. Vunter, J. Nagle. Appl. Phys. Lett., **71** (26), 3752 (1997).
- [6] S.G. Patterson, G.S. Petrich, R.J. Ram, L.A. Kolodziejski. Electron. Lett., **35**, 395 (1999).
- [7] C. Hanke, L. Korte, B.D. Acklin, M. Behringer, G. Herrmann, J. Luft, B. De Odorico, M. Marchiano, J. Wilhelmi. Proc. SPIE, **3947**, 50 (2000).
- [8] М.В. Зверков, В.П. Коняев, В.В. Крический, М.А. Ладугин, А.А. Мармалюк, А.А. Падалица, В.А. Симаков, А.В. Сухарев. Квант. электрон., **38** (11), 989 (2008).
- [9] С.О. Слипченко, Д.А. Винокуров, Н.А. Пихтин, З.Н. Соколова, А.Л. Станкевич, И.С. Тарасов, Ж.И. Алфёров. ФТП, **38** (12), 1477 (2004).
- [10] Н.А. Пихтин, С.О. Слипченко, З.Н. Соколова, И.С. Тарасов. ФТП, **38** (3), 347 (2004).

- [11] Д.А. Винокуров, А.Л. Станкевич, В.В. Шамахов, В.А. Капитонов, А.Ю. Лешко, А.В. Лютецкий, Д.Н. Николаев, Н.А. Пихтин, Н.А. Рудова, З.Н. Соколова, С.О. Слипченко, М.А. Хомылёв, И.С. Тарасов. ФТП, **40** (6), 764 (2006).
- [12] А.Ю. Андреев, С.А. Зорина, А.Ю. Лешко, А.В. Лютецкий, А.А. Мармалюк, А.В. Мурашова, Т.А. Нелёт, А.А. Падалица, Н.А. Пихтин, Д.Р. Сабитов, В.А. Симаков, С.О. Слипченко, К.Ю. Телегин, В.В. Шамахов, И.С. Тарасов. ФТП, **43** (4), 543 (2009).

Редактор Т.А. Полянская

Investigation of epitaxially-stacked tunnel-junction semiconductor lasers grown by MOCVD

D.A. Vinokurov, V.P. Konyaev, M.A. Ladugin*, A.V. Lyutetskiy, A.A. Marmalyuk*, A.A. Padalitsa*, A.N. Petrunov, N.A. Pikhitin, V.A. Simakov*, S.O. Slipchenko, A.V. Sukharev*, N.V. Fetisova, V.V. Shamakhov, I.S. Tarasov*

loffe Physicotechnical Institute
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

* Federal State Unitary Enterprise Research
and Development Institute „Polyus“,
117342 Moscow, Russia

Abstract The construction of epitaxially-stacked tunnel-junction asymmetric separate confinement laser heterostructures have been designed. Technological regimes of epitaxially-stacked tunnel-junction laser heterostructures growth by metal organical vapor deposition in AlGaAs/GaAs/InGaAs solid solution system have been determined. A possibility of growth in single technological process high efficiency GaAs:Si/GaAs:C tunnel structures and asymmetric AlGaAs/GaAs/InGaAs laser heterostructures with low internal optical loss has been demonstrated. Post-growth conditions of deep mesa formation for broad area mesastripe diode lasers manufacturing on the base of epitaxially-stacked tunnel-junction laser heterostructures have been chosen. Mesastripe diode lasers with $150 \times 12 \mu\text{m}$ aperture have been manufactured on their base. Threshold current density $J_{\text{th}} = 96 \text{ A/cm}^2$, internal optical loss $\alpha_i = 0.82 \text{ cm}^{-1}$ and series resistance $R = 280 \text{ m}\Omega$ have been attained in manufactured samples. Slope efficiency of 3 W/A and 250 W maximum peak output power have been reached under pulsed operation regime (100 ns, 1 kHz) in diode lasers containing three laser structures.