

Двухполосная генерация в эпитаксиально интегрированных туннельно-связанных полупроводниковых лазерах

© Д.А. Винокуров, М.А. Ладугин⁺, А.В. Лютецкий, А.А. Мармалюк⁺, А.Н. Петрунов, Н.А. Пихтин, С.О. Слипченко[¶], З.Н. Соколова, А.Л. Станкевич, Н.В. Фетисова, И.С. Шашкин, Н.С. Аверкиев, И.С. Тарасов

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

⁺ ФГУП НИИ „Полус“ им. М.Ф. Стельмаха,
117342 Москва, Россия

(Получена 11 ноября 2009 г. Принята к печати 16 ноября 2009 г.)

Методом МОС-гидридной эпитаксии выращены эпитаксиально интегрированные туннельно-связанные лазерные гетероструктуры в системе твердых растворов AlGaAs/GaAs/InGaAs. На основе таких структур изготовлены мезаполосковые лазеры с апертурой 150×7 мкм. Показана возможность управления длиной волны генерации за счет изменения толщины активной области в каждой туннельно-связанной лазерной структуре. Получена независимая двухполосная генерация на длинах волн 914 и 925 нм (разностная частота 2.3 ТГц) при максимальной оптической мощности излучения 20 Вт в каждой полосе эпитаксиально интегрированного туннельно-связанного полупроводникового лазера.

1. Введение

Создание двухполосных источников излучения является актуальной задачей благодаря широкому спектру их практических применений. Одним из видов двухполосных источников является двухполосный полупроводниковый лазер [1–3], в котором возможно нелинейное преобразование излучения и, в частности, генерация разностных гармоник с частотами терагерцового диапазона [4,5]. Для применения двухполосного полупроводникового лазера в устройствах нелинейного преобразования излучения предъявляются следующие требования: достаточная мощность в полосе излучения, узкая спектральная полоса излучения и возможность двухполосной генерации в одном диэлектрическом волноводе. Одним из способов повышения оптической мощности полупроводниковых лазеров является создание источников излучения на основе эпитаксиально интегрированных туннельно-связанных лазерных гетероструктур [1,2]. В работе [1] мы показали возможность получения эпитаксиально интегрированных туннельно-связанных лазерных гетероструктур, последовательно выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии (газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений) в одном технологическом процессе и связанных туннельными переходами. В [1] исследовались туннельные структуры с $p-n$ -переходами GaAs(Si)/GaAs(C). Цель настоящей работы состоит в выборе технологических условий МОС-гидридной эпитаксии для получения эпитаксиально интегрированных туннельно-связанных лазерных гетероструктур в системе твердых растворов AlGaAs/GaAs с напряженными квантовыми ямами из InGaAs, которые имеют двухполосный спектр излучения. Результатом работы явилось создание меза-

полосковых лазеров на основе таких туннельно-связанных лазерных гетероструктур.

2. Экспериментальные образцы мезаполосковых лазеров на основе эпитаксиально интегрированных туннельно-связанных лазерных гетероструктур

Методом МОС-гидридной эпитаксии были изготовлены эпитаксиально интегрированные туннельно-связанные лазерные гетероструктуры на основе твердых растворов в системе AlGaAs/GaAs с напряженными квантовыми ямами (КЯ) из InGaAs с одним туннельным $p-n$ -переходом. Энергетическая зонная диаграмма лазерной структуры показана на рис. 1. При создании этих гетероструктур применялись легирующие примеси — магний и кремний. Туннельные $p-n$ -переходы, связывающие лазерные структуры, изготавливались с использованием слабо диффундирующих легирующих примесей — углерода и кремния. Более подробно вопросы технологии изготовления структур рассмотрены в работе [6]. В данной работе при создании лазерных структур внимание было уделено прецизионному управлению длиной волны генерации при изменении толщины напряженных КЯ, образующих активные области гетеролазеров. В работе [7] была исследована фотолюминесценция лазерных гетероструктур с сильно напряженными КЯ из твердых растворов $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, окруженными GaAs-волноводом. В [7] было изучено влияние толщины этих КЯ на интенсивность и длину волны фотолюминесценции и было показано, что в области сильных напряжений ($x \geq 0.28$) в зависимости от рассогласования постоянных кристаллической

[¶] E-mail: sergHPL@mail.ioffe.ru

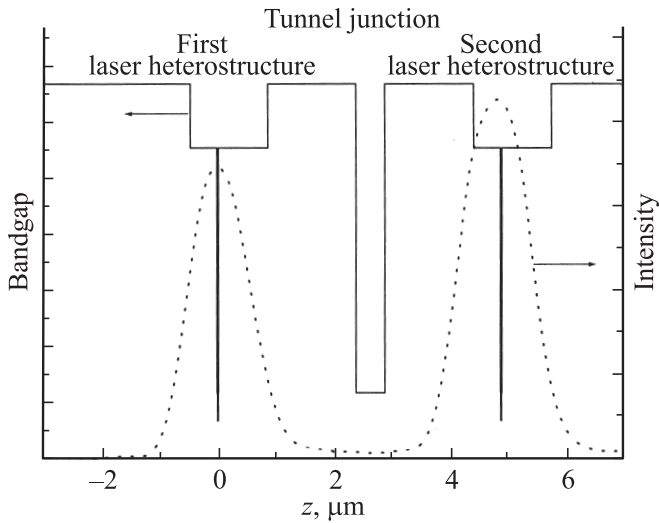


Рис. 1. Энергетическая зонная диаграмма эпитаксиально интегрированной туннельно-связанной лазерной гетероструктуры и картина распределения электромагнитного излучения (ближнее поле) в этой структуре. Z — координата в направлении, перпендикулярном слоям гетероструктуры.

решетки GaAs и твердого раствора $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ толщину активной области можно варьировать в диапазонах $40\text{--}60 \text{ \AA}$ ($x = 0.42$) или $50\text{--}80 \text{ \AA}$ ($x = 0.39$) без ухудшения излучательных характеристик. При меньших и больших толщинах квантовых ям наблюдалось падение интенсивности излучения. Уменьшение интенсивности излучения в области больших толщин связано с началом образования дефектов и дислокаций в сильно напряженных КЯ. Снижение интенсивности при уменьшении толщины КЯ связано с увеличением времени излучательной рекомбинации, а также с увеличением вклада безызлучательной рекомбинации на гетерограницах КЯ и волновода [7]. В менее напряженных КЯ ($x \approx 0.1$) можно увеличивать их толщину до 120 \AA без снижения интенсивности фотолюминесценции. Поэтому в изготавливаемых в настоящей работе структурах AlGaAs/GaAs/InGaAs толщина не очень сильно напряженных квантовых ям InGaAs варьировалась в пределах $50\text{--}110 \text{ \AA}$.

Изготовление активных лазерных элементов из эпитаксиально интегрированных туннельно-связанных лазерных структур проводилось аналогично изготовлению многомодовых мезаполосковых лазеров AlGaAs/GaAs/InGaAs с излучающей апертурой $\sim 150 \mu\text{m}$ [6]. Для обеспечения полного токового ограничения глубина вытравленных мезаканавок составляла $10 \mu\text{m}$. На торцы резонатора Фабри–Перо наносились зеркала и просветляющие покрытия. Активные лазерные элементы монтировались на медные теплоотводы и подготавливались для исследования излучательных характеристик.

3. Исследование излучательных характеристик мезаполосковых лазеров на основе эпитаксиально интегрированных туннельно-связанных лазерных структур с одним туннельным p – n -переходом

Все измерения проводились в импульсном режиме с длительностью токовых импульсов 100 нс и частотой повторения 1 кГц для исключения перегрева активной области туннельно-связанных лазерных структур.

В исследуемых структурах наблюдалось увеличение наклона ватт-амперной характеристики примерно в 2 раза по сравнению с одиночными лазерными структурами. Наклон ватт-амперной характеристики достигал 2 Вт/А при одновременном увеличении апертуры в мезаполосковых лазерах до $150 \times 7 \mu\text{m}$ по сравнению с $150 \times 2 \mu\text{m}$ для одиночных лазерных структур.

Для исследования спектральных характеристик эпитаксиально интегрированных туннельно-связанных лазерных структур была применена методика измерений, позволяющая регистрировать излучение только одной из туннельно-связанных лазерных структур. Для этого полупроводниковый лазер устанавливался эпитаксиальными слоями параллельно входной щели монохроматора. Оптическая система фокусировки обеспечивала возможность проецировать на входную щель монохроматора изображение только одной активной области лазерной структуры. Входная щель монохроматора имела ширину меньше $2 \mu\text{m}$, что гарантировало измерение спектра излучения из одной лазерной структуры.

На рис. 2 представлены спектральные характеристики мезаполосковых эпитаксиально интегрированных полупроводниковых лазеров с двумя туннельно-связанными лазерными структурами и одинаковыми квантовыми ямами толщиной 60 \AA , полученные при разных токах накачки.

Видно, что в спектральных характеристиках не наблюдалось существенного различия. Для полученных зависимостей можно отметить некоторое расширение спектров излучения, особенно при высоких уровнях токовой накачки, что, по нашему мнению, могло быть вызвано конечным временем энергетической релаксации носителей из волновода на уровне генерации [8]. Наблюдаемое на рис. 2 смещение спектров в длинноволновую область связано с разогревом лазерного кристалла. Оно составило 2 нм при возрастании тока накачки от порогового значения до 20 А . При этом для одинаковых токов положения спектральных полос активных областей каждой из туннельно-связанных структур не различались.

В картине дальнего поля исследуемых лазеров не наблюдалось каких-либо отличий от наблюдаемого для лазеров, состоящих из одной или нескольких лазерных структур, поскольку дальнее поле полностью определяется размерами излучающих поверхностей волноводов

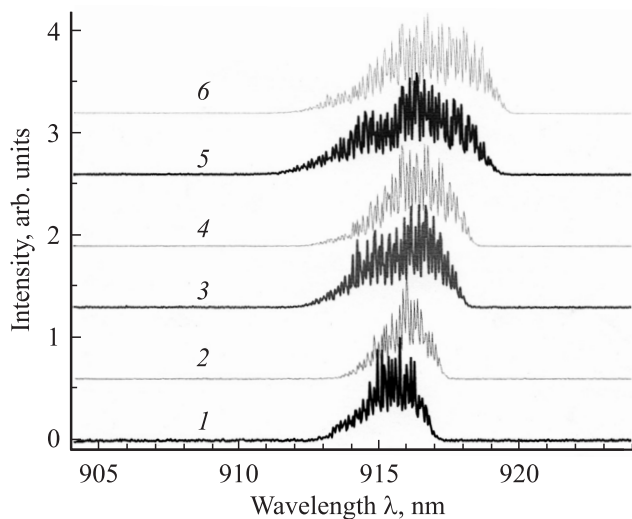


Рис. 2. Раздельные спектры излучения мезаполосковых лазеров на основе эпитаксиально интегрированных туннельно-связанных структур с одинаковыми квантовыми ямами толщиной 60 \AA , с одним туннельным $p-n$ -переходом, при токах накачки, А: (1, 2) — 4, (3, 4) — 10, (5, 6) — 20. 1, 3, 5 — первая, 2, 4, 6 — вторая гетероструктура.

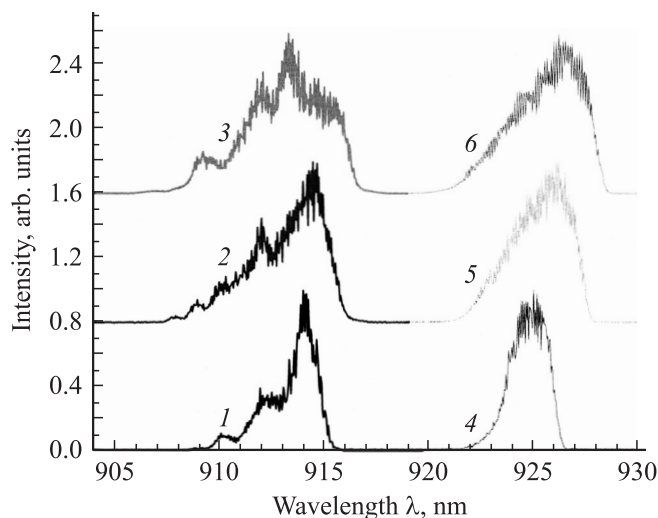


Рис. 3. Раздельные спектры излучения каждой из двух лазерных туннельно-связанных структур с квантовыми ямами толщиной 60 (1–3) и 100 \AA (4–6) с одним туннельным $p-n$ -переходом, при токах накачки, А: (1, 4) — 4, (2, 5) — 12, (3, 6) — 20.

и показателями преломления полупроводниковых материалов, формирующих волноводы. Расходимость излучения составляла 15 и 32° в параллельной и перпендикулярной плоскостях соответственно.

На рис. 1 приведено изображение ближнего поля (распределение интенсивности электромагнитного излучения перпендикулярно эпитаксиальным слоям). Расстояние между слоями активных областей в исследуемых структурах составляло 4.9 мкм . При этом ширина на

уровне половины от максимума интенсивности в картине ближнего поля составляла величину 1.3 мкм .

На рис. 3 представлены спектры излучения каждой по отдельности из туннельно-связанных лазерных структур за порогом генерации. Однако в этой эпитаксиально интегрированной туннельно-связанной лазерной структуре толщины КЯ сильно различались и составляли 60 и 100 \AA соответственно. В итоге была получена генерация на длинах волн 914 и 925 нм для активных областей с толщинами 60 и 100 \AA соответственно. Максимумы полос спектров генерации были смещены друг относительно друга на 16 мэВ , что соответствует генерации на разностной частоте 2.3 ТГц . Ширина на половине максимума интенсивности спектров излучения составляет единицы нанометров, что коррелирует с шириной спектров излучения одиночных лазерных структур. По площади, занимаемой спектром генерации каждой из лазерных структур, было оценено процентное соотношение излучаемой оптической мощности в каждой полосе. В пределах точности наших измерений каждой структурой излучалось 50% суммарной оптической мощности. При токе накачки 20 А пиковая выходная оптическая мощность для каждой спектральной линии излучения достигала 20 Вт .

4. Заключение

Показана возможность создания мощного полупроводникового импульсного источника излучения и управления спектром генерации туннельно-связанных лазеров, составляющих эпитаксиально интегрированную структуру. Исследования показали, что из каждой туннельно-связанной структуры излучается половина интегральной оптической мощности эпитаксиально интегрированного источника излучения. Наиболее надежным способом управления спектром излучения активной области является изменение толщины активной области лазерной структуры. Вариация толщины активной области в диапазоне $60\text{--}100 \text{ \AA}$ позволяет достигать изменения положения спектра генерации на 16 мэВ , что соответствует разностной частоте 2.3 ТГц . Значение пиковой выходной оптической мощности для каждой спектральной линии излучения достигало 20 Вт .

Работа выполнена при поддержке Государственного контракта № 02.513.12.3011 и гранта РФФИ № 07-02-00714-а.

Список литературы

- [1] 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**, 1253 (2009).
- [2] М.В. Зверков, В.П. Коняев, В.В. Кричевский, М.А. Ладугин, А.А. Мармалюк, А.А. Падалица, В.А. Симаков, А.В. Сухарев. Квант. электрон., **38**, 989 (2008).

- [3] А.А. Бирюков, Б.Н. Звонков, С.М. Некоркин, П.Б. Демина, Н.Н. Семенов, В.Я. Алешкин, В.И. Гавриленко, А.А. Дубинов, К.В. Маремьянин, С.В. Морозов, А.А. Белянин, В.В. Кочаровский, Вл.В. Кочаровский. *ФТП*, **41**, 1226 (2007).
- [4] S. Hoffmann, M. Hofmann, M. Kira, S.W. Koch. *Semicond. Sci. Technol.*, **20**, S205 (2005).
- [5] R. Wilk, A. Klehr, M. Mikulics, T. Hasek, M. Walther, M. Koch. *Electron. Lett.*, **43**, 108 (2007).
- [6] А.Ю. Андреев, С.А. Зорина, А.Ю. Лешко, А.В. Лютецкий, А.А. Мармалюк, А.В. Мурашова, Т.А. Налет, 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**, 543 (2009).
- [7] Д.А. Винокуров, В.А. Капитонов, Д.Н. Николаев, З.Н. Соколова, А.Л. Станкевич, В.В. Шамахов, И.С. Тарасов. *ФТП*, **43**, 1374 (2009).
- [8] С.О. Слипченко, З.Н. Соколова, Н.А. Пихтин, К.С. Борщёв, Д.А. Винокуров, И.С. Тарасов. *ФТП*, **40**, 1017 (2006).

Редактор Л.В. Шаронова

Double-band generation in epitaxially stacked tunnel-junction semiconductor lasers

D.A. Vinokurov, M.A. Ladugin⁺, A.V. Lyutetskii, A.A. Maramalyuk⁺, A.N. Petrunov, N.A. Pikhitin, S.O. Slipchenko, Z.N. Sokolova, A.L. Stankevich, N.V. Fetisova, I.S. Shashkin, N.S. Averkiev, I.S. Tarasov

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

*⁺ Polyus Research & Development Institute,
117342 Moscow, Russia*

Abstract Epitaxially stacked tunnel-junction AlGaAs/GaAs/InGaAs laser heterostructures were grown by metal organic chemical vapor deposition. Mesa stripe lasers with $10 \times 7 \mu\text{m}$ aperture were manufactured on the base of these structures. A possibility of emission wavelength control in each tunnel-junction laser heterostructure by changing its quantum well thickness was demonstrated. Generation of two independent bands at 914 and 925 nm wavelengths (frequency difference 2.3 THz) with 20 W peak power in each band was obtained in the epitaxially stacked tunnel-junction semiconductor laser source.