

## Температурная делокализация носителей заряда в полупроводниковых лазерах ( $\lambda = 1010\text{--}1070\text{ нм}$ )

© И.С. Шашкин, Д.А. Винокуров, А.В. Лютецкий, Д.Н. Николаев, Н.А. Пихтин, М.Г. Растегаева, З.Н. Соколова, С.О. Слипченко, А.Л. Станкевич, В.В. Шамахов, Д.А. Веселов, А.Д. Бондарев, И.С. Тарасов<sup>¶</sup>

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

(Получена 13 марта 2012 г. Принята к печати 20 марта 2012 г.)

Исследованы температурные зависимости излучательных характеристик полупроводниковых лазеров на основе асимметричных гетероструктур раздельного ограничения с расширенным волноводом, изготовленных методом МОС-гидридной эпитаксии (длины волн  $\lambda = 1010\text{--}1070\text{ нм}$ ). Установлено, что в непрерывном режиме генерации основным механизмом насыщения ватт-амперной характеристики с ростом температуры активной области является процесс делокализации носителей заряда в волноводный слой. Экспериментально показано, что температурная делокализация носителей заряда зависит от энергетической глубины квантовой ямы активной области. Показано, что минимальные внутренние оптические потери при  $140^\circ\text{C}$  достигаются в лазерных структурах с максимальной энергетической глубиной квантовой ямы активной области.

### 1. Введение

Данная работа продолжает цикл исследований, посвященных мощным непрерывным полупроводниковым лазерам [1–5]. Одной из основных проблем, требующих решения, является ограничение излучаемой оптической мощности в непрерывном режиме генерации при больших токах накачки. В наших предыдущих работах были исследованы как эффект температурной делокализации носителей заряда в волноводные слои лазерной структуры [6], так и температурная зависимость пороговой плотности тока и дифференциальной квантовой эффективности в полупроводниковых лазерах [7]. Исследованию температурной зависимости внутренних оптических потерь в полупроводниковых лазерах на основе асимметричных гетероструктур раздельного ограничения была посвящена работа [8]. В отличие от работ [6–8], в настоящей работе исследования температурной делокализации носителей заряда в волноводные слои проводились для полупроводниковых лазеров, излучающих в диапазоне длин волн  $1010\text{--}1070\text{ нм}$ . В данном случае достигается большая энергетическая глубина квантовой ямы для электронов в активной области полупроводникового лазера в системе твердых растворов InGaAs/AlGaAs.

Цель настоящей работы состояла в исследовании температурной делокализации носителей заряда в волноводные слои полупроводниковых лазеров на основе асимметричных гетероструктур раздельного ограничения с различной энергетической глубиной квантовых ям в активной области полупроводникового лазера, изготовленного методом МОС-гидридной эпитаксии (газофазной эпитаксии из металл-органических соединений).

### 2. Экспериментальные образцы

Для исследований была выбрана квантово-размерная асимметричная двойная гетероструктура раздельно-

го ограничения с расширенным волноводом. Лазерные гетероструктуры изготавливались с использованием систем полупроводниковых твердых растворов InGaAs/AlGaAs методом МОС-гидридной эпитаксии на модифицированной установке EMCORE-GS 3100, аналогично структурам, исследованным в [1,9]. Лазерные структуры различались составом твердого раствора волноводного слоя и активной области. В лазерной гетероструктуре I типа активная область расположена непосредственно между волноводными слоями GaAs. В лазерной гетероструктуре II типа активная область расположена между волноводными слоями  $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ . Лазерная гетероструктура III типа имела волновод из твердого раствора  $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  с наибольшим содержанием алюминия. В лазерных гетероструктурах всех трех типов длина волны генерации составляла  $1060\text{ нм}$ , а толщина квантовых ям активной области была  $\sim 90\text{ \AA}$ . С увеличением содержания алюминия в волноводных слоях энергетическая глубина квантовых ям для электронов возрастала (см. таблицу). В лазерной гетероструктуре IV типа волновод был из твердого раствора  $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ . Состав твердого раствора активной области толщиной  $50\text{ \AA}$  отличался от предыдущих, что обеспечивало генерацию излучения на длине волны  $1015\text{ нм}$  и энергетическую глубину квантовой ямы, близкую к энергетической глубине для лазерной структуры I типа. Лазерная гетероструктура IV типа была выбрана для демонстрации того, что именно энергетическая глубина квантовой ямы для электронов в активной области, а не состав активной области и волновода определяет величину температурной делокализации в полупроводниковом лазере. Данные, характеризующие исследуемые лазерные структуры, сведены в таблицу.

Из лазерных гетероструктур по стандартной технологии изготавливались мезаполосковые лазеры с апертурой излучения  $100\text{ мкм}$  и длиной резонатора Фабри–Перо  $\sim 3\text{ мм}$ . Активные элементы полупроводниковых лазеров монтировались на теплоотвод двумя

<sup>¶</sup> E-mail: tarasov@hpld.ioffe.ru

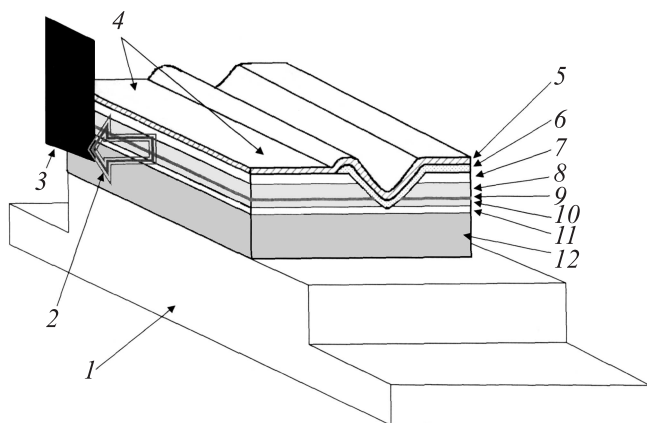
Параметры лазерных структур

Тип и номер лазерной структуры	I тип EM-2513	II тип EM-2523	III тип EM-2567	IV тип EM-2575
Материал и состав волновода	GaAs	$\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$	$\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$	$\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$
Материал и состав эмиттера	$\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$	$\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$	$\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$	$\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$
Толщина активной области, Å	90	90	90	50
Длина волны генерации, нм	1060	1060	1060	1015
Энергетическая глубина квантовой ямы активной области для электронов, мэВ	172	211	303	190
Внутренние оптические потери при 20°C, $\text{см}^{-1}$	0.64	0.47	0.46	0.31
Внутренние оптические потери при 90°C, $\text{см}^{-1}$	4.4	2.3	0.92	2.32
Внутренние оптические потери при 140°C, $\text{см}^{-1}$	—	4.76	2.32	6.8

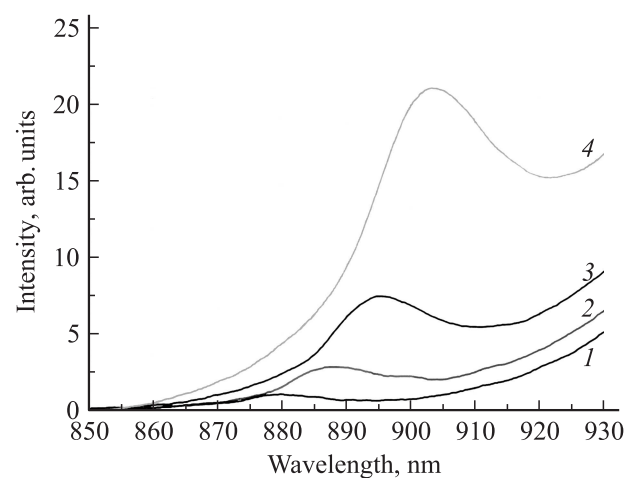
способами: для наблюдения излучения по оси резонатора Фабри–Перо и перпендикулярно оси резонатора Фабри–Перо. После монтажа экспериментальных образцов на теплоотвод в непрерывном и импульсном режимах генерации исследовались пороговые, спектральные и мощностные характеристики лазера в зависимости от температуры теплоотвода.

### 3. Результаты экспериментальных исследований

Явление температурной делокализации — это процесс перераспределения носителей заряда на высокоэнергетические состояния квантовых ям активной области (в том числе не локализованные в квантовой яме) в результате повышения температуры и концентрации. Следствием этого является увеличение концентрации носителей заряда в волноводных слоях лазерной гетероструктуры, которое также зависит от энергетической глубины квантовых ям в активной области полупроводникового лазера.



**Рис. 1.** Схема эксперимента и конструкция диодного лазера: 1 — теплоотвод, 2 — спонтанное излучение из волновода и активной области, 3 — шторка от паразитного стимулированного излучения, 4 — активный полосок, 5 — слой металла, 6 — слой  $\text{SiO}_2$ , 7 — *p*-эмиттер, 8 — волновод, 9 — активная область, 10 — волновод, 11 — *n*-эмиттер, 12 — подложка.



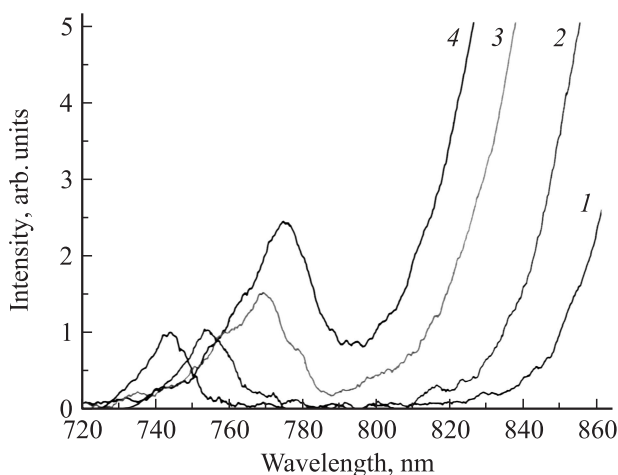
**Рис. 2.** Спектры спонтанного излучения для структуры I типа с волноводными слоями из арсенида галлия при температурах теплоотвода полупроводникового лазера 20 (1), 40 (2), 60 (3), 80°C (4).

На рис. 1 приведено схематическое изображение эксперимента для наблюдения излучения в направлении, перпендикулярном оси резонатора Фабри–Перо. Дополнительно, для снижения интенсивности стимулированного излучения, зеркала резонатора Фабри–Перо закрываются шторками. С помощью микрообъективов из боковой грани резонатора собирается в основном только спонтанное излучение из слоев лазерной структуры. На рис. 2 приведены спектры электролюминесценции, зарегистрированные в направлении, перпендикулярном оси резонатора для структуры I типа с волноводными слоями из арсенида галлия, снятые при нескольких температурах теплоотвода полупроводникового лазера. Накачка исследуемых образцов проводилась импульсным током с длительностью импульса  $\sim 1\text{ мкс}$  и частотой повторения  $\sim 1\text{ кГц}$ . Такой режим токовой накачки (плотность тока  $\sim 5\text{ кА/см}^2$ ) не давал сильного дополнительного перегрева активной области полупроводникового лазера. Поэтому в эксперименте температура полупроводникового лазера, в том числе активной области, определялась температурой теплоотвода и варьирова-

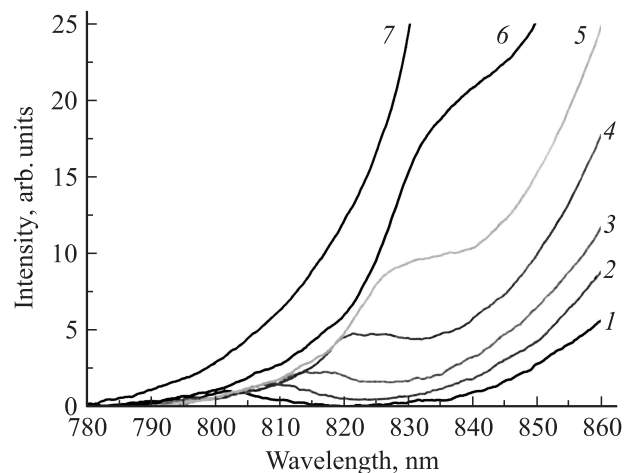
лась в диапазоне 20–140°C. В спектрах электролюминесценции при комнатной температуре видны отдельные полосы излучения активной области и волноводного слоя. Однако при температуре теплоотвода 40–50°C волноводная полоса сливается с коротковолновым краем полосы излучения активной области. Энергетическая глубина квантовой ямы для электронов в данной структуре составляет величину 172 мэВ (см. таблицу). Перераспределение носителей заряда из активной области в волноводные слои свидетельствует о температурной делокализации. В результате часть инжектированных в волновод носителей заряда на захватывается квантовой ямой активной области вследствие устанавливающегося динамически равновесного состояния, характеризуемого температурой, пороговой концентрацией и энергетической глубиной квантовой ямы.

На рис. 3 приведены аналогичные спектры электролюминесценции при нескольких температурах теплоотвода для структуры III типа с волноводными слоями из твердого раствора  $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ . Энергетическая глубина квантовой ямы для электронов в структуре III типа составляет величину 303 мэВ (см. таблицу). Такого увеличения энергетической глубины квантовой ямы достаточно для того, чтобы полосы излучения активной области и волноводных слоев не объединились в одну даже при температуре 140°C. В этом случае происходит только слабое перераспределение носителей заряда, но оно не ведет к сильному росту концентрации в волноводных слоях и, как следствие, к сильному увеличению внутренних оптических потерь. В этой структуре наблюдается самый низкий уровень температурной делокализации носителей заряда в волноводные слои лазерной структуры.

В структуре IV типа с волноводами из полупроводникового твердого раствора  $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$  энергетическая глубина квантовой ямы для электронов в активной области составила 190 мэВ, что практически совпадает со



**Рис. 3.** Спектры спонтанного излучения для структуры III типа с волноводными слоями из твердого раствора  $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  при температурах теплоотвода 20 (1), 60 (2), 120 (3), 140°C (4).



**Рис. 4.** Спектры спонтанного излучения для структуры IV типа с волноводами из полупроводникового твердого раствора  $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$  при температурах теплоотвода 20 (1), 40 (2), 60 (3), 80 (4), 100 (5), 120 (6), 140°C (7).

значением энергетической глубины квантовой ямы для структуры I типа. Следовательно, в такой структуре эффект температурной делокализации должен возрасти по сравнению со структурами II и III типов и приблизиться к таковому в структуре I типа. На рис. 4 приведены спектры электролюминесценции, зарегистрированные в направлении, перпендикулярном оси резонатора, для структуры IV типа с волноводными слоями из твердого раствора  $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$  при нескольких температурах теплоотвода полупроводникового лазера. При комнатной температуре наблюдаются две отдельные полосы излучения квантовой ямы активной области и волноводного слоя. Уже при температуре 80–90°C наблюдается поглощение волноводной полосы излучения хвостом полосы излучения активной области, что связано с эффектом сильной температурной делокализации носителей заряда в исследуемой структуре, приближающейся к уровню делокализации в структуре I типа.

Оценка величины процесса температурной делокализации по спектрам электролюминесценции носит качественный характер. Для количественной оценки этого явления мы исследовали ватт-амперные характеристики полупроводниковых лазеров с разной длиной резонатора, изготовленных из лазерных структур четырех типов. Исследования проводились при трех температурах теплоотвода: 20, 90 и 140°C (см. таблицу). Это позволило нам получить зависимости обратной величины дифференциальной квантовой эффективности от длины резонатора полупроводникового лазера при этих температурах. Как известно, из таких зависимостей можно получить количественную оценку величин внутреннего квантового выхода и внутренних оптических потерь в исследуемых лазерных структурах [8]. Из полученных экспериментальным путем зависимостей были определены величины внутренних оптических потерь для трех различных температур (см. таблицу). Из данных, приведенных в таблице, следует, что в лазерных структурах

величина внутренних оптических потерь при высоких температурах коррелирует с энергетической глубиной квантовой ямы активной области. Для полупроводниковых лазеров из структур I типа генерации при  $140^\circ\text{C}$  достичь не удавалось. Для лазеров из структуры IV типа при  $140^\circ\text{C}$  зарегистрировано максимальное значение величины внутренних оптических потерь. Величина минимальных внутренних потерь при  $140^\circ\text{C}$  была достигнута в полупроводниковых лазерах из структуры III типа с максимальной энергетической глубиной квантовой ямы для электронов в активной области и составила величину  $2.3\text{ см}^{-1}$ . Это позволило нам сделать вывод о том, что в этой структуре наблюдается минимальная величина температурной делокализации носителей заряда в волноводной слое лазерной структуры. При комнатной температуре, когда процесс температурной делокализации незначителен, величина внутренних оптических потерь для трех типов структур I–III практически одинакова. Для лазеров из структуры IV типа с толщиной активной области  $50\text{ \AA}$  величина внутренних оптических потерь достигает своего минимального значения, что связано с уменьшением фактора оптического ограничения.

#### 4. Заключение

В результате проведенных исследований показано, что процесс температурной делокализации носителей заряда зависит от трех параметров: температуры активной области, пороговой концентрации носителей заряда и энергетической глубины квантовой ямы для электронов в активной области. С ростом температуры возрастает пороговая концентрация и происходит процесс перераспределения носителей заряда по энергетическим уровням квантовых ям активной области. Энергетическая глубина квантовой ямы активной области определяет число делокализованных (не захваченных носителей заряда) в волноводные слои лазерной гетероструктуры раздельного ограничения. Увеличение концентрации носителей заряда в волноводных слоях ведет к росту внутренних оптических потерь и насыщению ватт-амперной характеристики полупроводникового лазера. Оптимальной конструкцией лазерной гетероструктуры для изготовления мощных непрерывных полупроводниковых лазеров является структура с максимальной энергетической глубиной квантовой ямы активной области.

Работа выполнена в ФТИ им. А.Ф. Иоффе по утвержденному плану лаборатории Полупроводниковой люминесценции и инжекционных излучателей за счет бюджетного финансирования Российской академии наук.

#### Список литературы

- [1] 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).
- [2] Д.А. Винокуров, Н.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. Хомылев, И.С. Тарасов. ФТП, **40** (6), 764 (2006).
- [3] А.В. Мурашова, Д.А. Винокуров, Н.А. Пихтин, С.О. Слипченко, В.В. Шамахов, В.В. Васильева, В.А. Капитонов, А.Ю. Лешко, А.В. Лютецкий, Т.А. Налет, Д.Н. Николаев, А.Л. Станкевич, Н.В. Фетисова, И.С. Тарасов, Y.S. Kim, D.H. Kang, C.Y. Lee. ФТП, **42** (7), 882 (2008).
- [4] А.В. Алуев, А.Ю. Лешко, А.В. Лютецкий, Н.А. Пихтин, С.О. Слипченко, Н.В. Фетисова, А.А. Чельный, В.В. Шамахов, В.А. Симаков, И.С. Тарасов. ФТП, **43** (4), 556 (2009).
- [5] 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** (4), 543 (2009).
- [6] С.О. Слипченко, И.С. Шашкин, Л.С. Вавилова, Д.А. Винокуров, А.В. Лютецкий, Н.А. Пихтин, А.А. Подоскин, А.Л. Станкевич, Н.В. Фетисова, И.С. Тарасов. ФТП, **44** (5), 688 (2010).
- [7] М.А. Ладугин, А.В. Лютецкий, А.А. Мармалюк, А.А. Падалица, Н.А. Пихтин, А.А. Подоскин, Н.А. Рудова, С.О. Слипченко, И.С. Шашкин, А.Д. Бондарев, И.С. Тарасов. ФТП, **44** (10), 1417 (2010).
- [8] Н.А. Пихтин, С.О. Слипченко, И.С. Шашкин, М.А. Ладугин, А.А. Мармалюк, А.А. Подоскин, И.С. Тарасов. ФТП, **44** (10), 1411 (2010).
- [9] N.A. Pikhtin, S.O. Slipchenko, Z.N. Sokolova, A.L. Stankevich, D.A. Vinokurov, I.S. Tarasov, Zh.I. Alferov. Electron. Lett., **40** (22), 1413 (2004).

Редактор Л.В. Шаронова

#### Temperature delocalization of charge carriers in semiconductor lasers ( $\lambda = 1010\text{--}1070\text{ nm}$ )

I.S. Shashkin, D.A. Vinokurov, A.V. Lyutetskiy, D.N. Nikolaev, N.A. Pikhtin, M.G. Rastegaeva, Z.N. Sokolova, S.O. Slipchenko, A.L. Stankevich, V.V. Shamakhov, D.A. Veselov, A.D. Bondarev, I.S. Tarasov

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

**Abstract** The temperature dependencies of emission characteristics of diode lasers, based on asymmetric separate confinement heterostructures with broadened waveguide (wavelengths  $\lambda = 1050\text{--}1070\text{ nm}$ ) grown by the metalloorganic chemical vapor deposition method have been investigated. It has been established, that at continuous wave regime of generation, delocalization of charge carriers into the waveguide layer is the main mechanism of light-current characteristics saturation with temperature rise. It has been shown experimentally, that the temperature delocalization of charge carriers depends on the active region quantum well energy depth. It has been demonstrated, that at  $140^\circ\text{C}$  the minimal internal optical losses are achievable in laser structures with maximal energy depth of quantum well of the active region.