

07:09

Подавление процесса делокализации носителей заряда в мощных импульсных полупроводниковых лазерах

© Д.А. Веселов¹, И.С. Шашкин¹, Н.А. Пихтин^{1,2}, С.О. Слипченко¹,
З.Н. Соколова¹, И.С. Тарасов¹

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

² Санкт-Петербургский государственный университет

E-mail: dmitriy90@list.ru

Поступило в Редакцию 30 сентября 2014 г.

Исследован процесс делокализации носителей заряда в мощных полупроводниковых лазерах в импульсном режиме генерации при высоких уровнях токовой накачки. Установлено, что процесс делокализации носителей заряда в полупроводниковых лазерах определяется в основном выбросом в волновод электронов, а не дырок. Экспериментально продемонстрировано два способа подавления процесса делокализации носителей заряда при увеличении ширины запрещенной зоны волновода и использовании волновода, содержащего потенциальный энергетический барьер для электронов в p -области.

В мощных полупроводниковых лазерах на основе двойных гетероструктур отдельного ограничения [1–3] наблюдается эффект токовой утечки в результате делокализации носителей заряда из активной области в волновод [1]. В непрерывном режиме генерации эффект делокализации носителей заряда в волноводные слои лазерной структуры наступает в результате перегрева активной области лазера [2]. В импульсном режиме генерации делокализация носителей заряда происходит из-за недостаточно высокой скорости захвата носителей заряда в активную область при высоких уровнях токовой накачки [4]. В обоих случаях рост концентрации носителей заряда в волноводе ведет к увеличению внутренних оптических потерь и насыщению ватт-амперной характеристики (ВтАХ) [1,2,4].

Данная работа продолжает исследование делокализации носителей заряда в волноводные слои в полупроводниковых лазерах в импульсном режиме генерации и поиск возможных путей подавления этого процесса.

Для исследований были изготовлены три типа лазерных двойных гетероструктур раздельного ограничения с квантово-размерной активной областью на основе системы твердых растворов InGaAs/AlGaAs/GaAs. Структуры различаются геометрией и составом эмиттеров, волноводов, количеством и толщиной квантовых ям.

Структура I типа представляет собой конструкцию мощного полупроводникового лазера с расширенным волноводом толщиной $1.7\ \mu\text{m}$ из арсенида галлия. Активная область состоит из одной квантовой ямы (КЯ) $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ толщиной $90\ \text{\AA}$ и составом твердого раствора, подобранным для генерации на длине волны $1060\ \text{nm}$. КЯ смещена к p -эмиттеру для борьбы с поперечными модами высших порядков.

Структура II типа, в отличие от структуры I типа, имеет волновод из твердого раствора $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$.

Конструкция лазерной гетероструктуры III типа представлена на рис. 1. Дизайн структуры объединяет волновод из GaAs с низким уровнем внутренних оптических потерь и широкозонные слои для борьбы с эффектами делокализации носителей в p -волновод и их утечки в p -эмиттер. Большое количество слоев и сложная геометрия волновода потребовались для обеспечения необходимых факторов оптического ограничения в активной области и в эмиттерах (особенно в высоколегированном p -эмиттере). Активная область состоит из двух КЯ толщиной $65\ \text{\AA}$.

Гетероструктуры изготавливались методом МOC-гидридной эпитаксии на модифицированной установке EMCORE-3100 GS [5]. Одиночные полупроводниковые лазеры с апертурой излучения $100\ \mu\text{m}$ изготавливались по стандартной технологии с применением типовой конструкции активного элемента „глубокая меза“, которая предусматривает заключение области протекания тока между протравленными через всю лазерную структуру глубокими наклонными мезами [6,7].

Образцы лазеров изготавливались специально для наблюдения спонтанного излучения перпендикулярно оси резонатора Фабри–Перо. В таких образцах скол выполняется по полоску параллельно оси резонатора для беспрепятственного вывода спонтанного излучения из активной области и волновода. Пайка лазера на теплоотвод осуществлялась p -стороной вниз, к теплоотводу прикреплялись шторки, перекрывающие паразитное стимулированное излучение с торцов резонатора Фабри–Перо.

Для исследований электролюминесцентных характеристик полупроводниковых лазеров использовался блок накачки токовыми импульсами

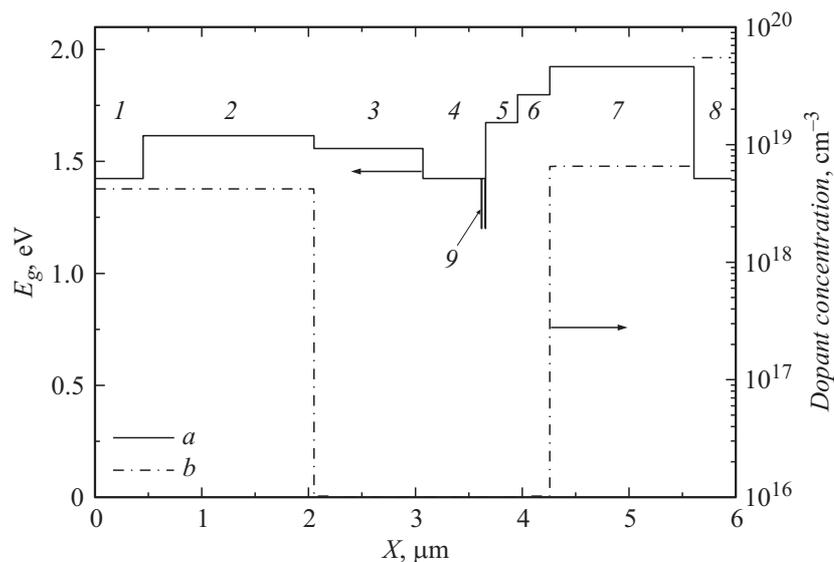


Рис. 1. Конструкция лазерной гетероструктуры V2125: *a* — ширина запрещенной зоны, *b* — концентрация легирующей примеси; 1 — буферный GaAs, 2 — *N*-эмиттер $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$, 3 — волновод $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$, 4 — волновод GaAs, 5 — волновод $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$, 6 — волновод $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$, 7 — *P*-эмиттер $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$, 8 — контактный GaAs, 9 — активная область: 2 квантовые ямы InGaAs по 65 Å, длина волны генерации 1050 nm.

с изменяемой амплитудой до 200 А длительностью 100 ± 20 ns на полувысоте, частотой 104 ± 20 Hz. Исследование проводилось в диапазоне амплитуд токов 10–60 А, при которых наблюдается насыщение ВтАХ лазера в импульсном режиме и мала вероятность деградации образцов.

Исследование спонтанного излучения производилось с целью обнаружить процесс делокализации носителей заряда из активной области в волноводные слои при увеличении амплитуды токовой накачки. Для этого изучалось поведение линии, соответствующей рекомбинации носителей заряда с волноводных энергетических уровней.

На рис. 2, *a* показаны спектры электролюминесценции лазера на основе структуры I типа с наименьшей глубиной квантовой ямы относительно дна зоны проводимости волновода. В спектре спонтанного

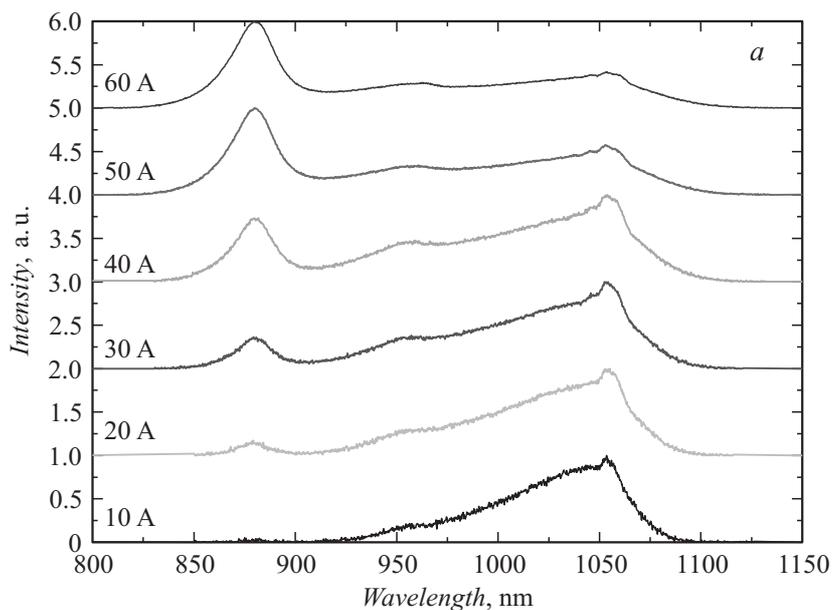


Рис. 2. Спектры спонтанного излучения лазеров на основе гетероструктуры I (a) и III (b) типа при различных амплитудах тока накачки.

излучения присутствуют три интенсивные линии: линия рассеянного излучения лазерной генерации, примерно совпадающая с линией рекомбинации с первого электронного уровня (1060 nm) на первый дырочный, линия рекомбинации со второго электронного уровня (950 nm) на второй дырочный, линия излучения волновода (870 nm). Интенсивность волноводной линии сильно возрастает с ростом тока накачки, что свидетельствует о возрастании концентрации носителей заряда в волноводном слое.

Одним из способов подавления этого процесса является увеличение энергетической глубины активной области за счет увеличения ширины запрещенной зоны волновода. Поэтому следующим объектом исследований был выбран образец из структуры II типа с максимальной шириной запрещенной зоны волновода. Как и следовало ожидать, волноводная линия в нем отсутствует при максимальном уровне импульсной токовой накачки.

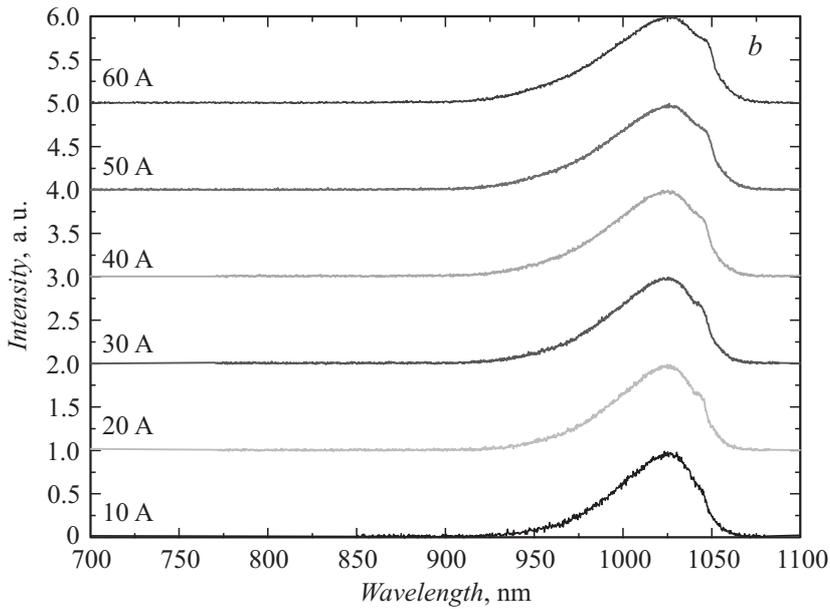


Рис. 2 (продолжение).

Таким образом, в импульсном режиме с увеличением амплитуды тока накачки наблюдается процесс делокализации носителей заряда, причем этот процесс можно подавить увеличением ширины запрещенной зоны волновода.

Структура III типа содержит две узкие квантовые ямы с одним электронным уровнем в каждой, волновод из GaAs с n -стороны и широкозонные волноводные слои со стороны p -эмиттера. В такой структуре потенциальный барьер с p -стороны препятствует делокализации электронов в p -область, в то же время ничто не препятствует возможной утечке дырок в n -область. Однако в спектре электролюминесценции (рис. 2, b) присутствует только линия рекомбинации с первого электронного уровня активной области. Других полос рекомбинации, соответствующих волноводным слоям в спектрах, обнаружено не было во всем диапазоне импульсной токовой накачки. Поскольку p -волновод имеет сложную зонную структуру и содержит различные по составу слои, поиск электролюминесцентного излучения осуществлялся в широком диапазоне длин волн от 700 nm.

Характеристики лазеров на основе исследованных гетероструктур вблизи порога лазерной генерации

Тип лазерной гетероструктуры	Внутренние оптические потери, cm^{-1}	Внутренний квантовый выход стимулированного излучения, %
I	0.4	90
II	0.47	98
III	0.54	98

Исследование серий лазеров с различной длиной резонатора для каждого типа лазерных гетероструктур позволило определить величины внутренних оптических потерь и внутреннего квантового выхода стимулированного излучения вблизи порога генерации по стандартной методике. Результаты исследований приведены в таблице. В лазерах на основе гетероструктур с увеличенной энергетической глубиной активной области достигается максимальное значение величины стимулированного квантового выхода, что свидетельствует о снижении токовых утечек. Однако конструктивные изменения вносят дополнительные потери, и величина внутренних оптических потерь для гетероструктуры с волноводом из GaAs остается минимальной.

Таким образом, в результате исследований было установлено, что явление делокализации носителей заряда в полупроводниковом лазере при высоких уровнях токовой накачки в импульсном режиме генерации обусловлено в основном выбросом в волновод электронов, а не дырок. Экспериментально было определено два способа подавления процесса делокализации носителей заряда в лазерах, работающих в импульсном режиме в спектральном диапазоне 1.0–1.1 μm : увеличение энергетической глубины активной области за счет увеличения ширины запрещенной зоны волновода и использование волновода сложной конструкции, содержащей потенциальный энергетический барьер для электронов в p -области. Необходимо отметить, что найденные решения по подавлению процесса делокализации приводят к увеличению величины внутреннего квантового выхода стимулированного излучения с одновременным некоторым увеличением внутренних оптических потерь.

Проводимые нами в настоящее время исследования позволяют отметить, что полученные результаты применимы для лазеров других спектральных диапазонов, в особенности для лазеров безопасного для глаз диапазона длин волн 1.4–1.6 μm на основе системы твердых

растворов AlGaInAs/InP. Одним из основных процессов, ограничивающих мощность лазеров этого диапазона, является процесс утечки носителей в волноводные слои [8], поэтому применение в конструкции лазеров на основе твердых растворов AlGaInAs/InP тех же методик подавления делокализации позволит бороться с утечкой носителей заряда и повысить мощностные характеристики лазеров.

Работа выполнена при поддержке Федеральной целевой программы „Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы“, прикладные научные исследования по теме „Разработка МОС-гидридной технологии наногетероструктур и мощных непрерывных и импульсных полупроводниковых лазеров на их основе, излучающих в диапазоне длин волн 1400–1600 нм“, шифр 2014-14-579-0066; соглашение № 14.607.21.0048, уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI60714X0048.

Список литературы

- [1] Шашкин И.С., Винокуров Д.А., Лютецкий А.В., Николаев Д.Н., Пихтин Н.А., Растегаева М.Г., Соколова З.Н., Слипченко С.О., Станкевич А.Л., Шамахов В.В., Веселов Д.А., Бондарев А.Д., Тарасов И.С. // ФТП. 2012. Т. 46(9). С. 1230.
- [2] Слипченко С.О., Шашкин И.С., Вавилова Л.С., Винокуров Д.А., Лютецкий А.В., Пихтин Н.А., Подоскин А.А., Станкевич А.Л., Фетисова Н.В., Тарасов И.С. // ФТП. Т. 44(5). С. 688.
- [3] Wang X., Crump P., Wenzel H., Liero A., Hoffmann T., Pietrzak A., Schultz C.M., Klehr A., Ginolas A., Einfeldt S., Bugge F., Erbert G., Tränkle G. // IEEE J. Quantum Electron. 2010. V. 46(5). P. 658.
- [4] Соколова З.Н., Тарасов И.С., Асрян Л.В. // ФТП. 2011. Т. 45(11). С. 1553.
- [5] Булаев П.В., Капитонов В.А., Лютецкий А.В., Мармалюк А.А., Никитин Д.Б., Николаев Д.Н., Падалица А.А., Пихтин Н.А., Бондарев А.Д., Залевский И.Д., Тарасов И.С. // ФТП. 2012. Т. 36(9). С. 1144.
- [6] Слипченко С.О., Винокуров Д.А., Лютецкий А.В., Пихтин Н.А., Станкевич А.Л., Фетисова Н.В., Бондарев А.Д., Тарасов И.С. // ФТП. 2009. Т. 43(10). С. 1409.
- [7] Слипченко С.О., Подоскин А.А., Винокуров Д.А., Станкевич А.Л., Лешко А.Ю., Пихтин Н.А., Забродский В.В., Тарасов И.С. // ФТП. 2011. Т. 45(10). С. 1431.
- [8] Piprek J., Kenton White J., Spring Thorpe A.J. // IEEE J. Quantum Electron. 2002. V. 38(9). P. 1253.