ЛАЗЕРЫ

Малогабаритные суперлюминесцентные диоды AlGaInAs/InP с напряженно-компенсированными квантовыми ямами для волоконно-оптических гироскопов

Д.Р.Сабитов, В.Н.Светогоров, Ю.Л.Рябоштан, М.А.Ладугин, А.А.Мармалюк, М.Г.Васильев, А.М.Васильев, Ю.О.Костин, А.А.Шелякин

Исследованы малогабаритные суперлюминесцентные диоды, созданные на основе двойных гетероструктур раздельного ограничения AlGaInAs/InP с напряженно-компенсированными квантовыми ямами. Продемонстрированы характеристики данных диодов, позволяющие применять их для создания волоконно-оптических гироскопов в температурном диапазоне –55 °C – +70 °C. Приборы показали приемлемую надежность и потенциал к дальнейшему улучшению.

Ключевые слова: *суперлюминесцентный диод, квантовая яма, компенсация упругих напряжений, AlGaInAs/InP, волоконно-оптический гироскоп.*

1. Введение

Тематика волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) активно развивается в последние десятилетия благодаря сочетанию в них ряда важных качеств. Такие приборы не имеют подвижных частей, быстрее прочих выходят на рабочий режим и характеризуются продолжительным сроком службы. Развитие технологий позволило достичь в современных ВОГ точностей, позволяющих использовать их в навигационных системах. Кроме того, ВОГ имеют достаточно невысокую стоимость, что делает их привлекательными для многих практических применений [1–3].

Как правило, при создании ВОГ используются волоконные световоды с минимальными оптическими потерями в спектральном диапазоне 1500–1600 нм, что требует источника оптического излучения с соответствующей длиной волны. При этом данный источник должен обеспечивать выходную мощность порядка единиц милливатт, малые длину когерентности и глубину остаточной модуляции спектра. Это необходимо для минимизации паразитных эффектов [1]. В этой связи суперлюминесцентные диоды (СЛД) с медианной длиной волны излучения в районе 1550 нм широко используются в качестве источников света для ВОГ.

Не в последнюю очередь конструкция источников света для ВОГ должна учитывать такие характеристики, как габаритные размеры, масса и стоимость. Популярным решением вследствие этого являются СЛД в миниатюрных корпусах без элемента Пельтье. Для практической реализации такого прибора необходимо использовать гетероструктуры, обеспечивающие повышенную термическую стабильность. Для СЛД, излучающих вблизи 1550 нм, подобная задача решается путем использования гетероструктур AlGaInAs/InP. Данная система материалов превосходит по величине разрыва зоны проводимости альтернативную систему материалов GaInAsP [4]. Это усиливает локализацию электронов в квантовых ямах на основе AlGaInAs и обеспечивает улучшенную работоспособность при повышенных температурах. Дальнейшее увеличение энергетической глубины квантовых ям и повышение термической устойчивости СЛД возможно путем перехода к напряженно-компенсированным активным областям [5, 6], которые, кроме того, будут способствовать снижению негативного влияния безызлучательных процессов Оже-рекомбинации [7–9]. В связи с этим перспективным представляется исследование применимости гетероструктур AlGaInAs/InP с напряженно-компенсированными квантовыми ямами [10] для создания СЛД, чему и посвящена настоящая работа.

2. Экспериментальная часть

Для создания экспериментальных СЛД, как и в работе [10], использовалась двойная гетероструктура с раздельным ограничением AlGaInAs/InP с множественными напряженно-компенсированными квантовыми ямами в активной области. Традиционная конструкция СЛД, включающая прямой наклонный волновод, просветляющее покрытие на гранях кристалла и электрически изолированный поглотитель на нерабочем торце, была призвана обеспечить подавление оптической обратной связи с целью минимизации паразитной модуляции спектра и достижения максимальной ширины последнего. Для ввода излучения в одномодовый волоконный световод (ОВС) использовались торцевые волоконные микролинзы оптимизированной геометрии, позволяющие получить коэффициент ввода около 35%. В отличие от [10], в настоящей работе СЛД-чипы устанавливались в корпуса без элемента Пельтье. Такие корпуса, габаритные размеры которых составляют 22.7 × 10.0 × 6.3 мм, го-

Д.Р.Сабитов, В.Н.Светогоров, Ю.Л.Рябоштан, М.А.Ладугин. ООО «Сигм плюс», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3; e-mail: d.sabitov@siplus.ru
А.А.Мармалюк. ООО «Сигм плюс», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31
М.Г.Васильев, А.М.Васильев, Ю.О.Костин, А.А.Шелякин. Институт общей и неорганической химии им. Н.С.Курнакова РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 31

Поступила в редакцию 3 марта 2022 г., после доработки – 5 апреля 2022 г.

раздо компактнее ранее использованных корпусов с элементом Пельтье (габаритные размеры: 30.0 × 12.7 × 10.8 мм). Сами корпуса монтировались на пассивный медный радиатор, обеспечивающий постоянство температуры их нижней поверхности.

В первом эксперименте радиатор с исследуемыми приборами помещался в камеру тепла и холода, а волокна и контакты выводились наружу для управления током накачки и контроля характеристик. Измерения проводились при помощи драйвера Maiman SF8150 в режиме постоянной накачки. Для обеспечения стабильного температурного режима приборы на радиаторе выдерживались перед проведением измерений при каждой заданной температуре в течение часа.

Серия экспериментов была посвящена исследованию надежности созданных СЛД. Для этой цели модули последовательно подвергались таким испытаниям, как выдержка при температуре –55 °С в течение 100 ч, выдержка при +70 °С в течение 100 ч, быстрое изменение температуры среды (10 термоциклов с изменением температуры от –55 °С до +70 °С).

Последним этапом испытаний стала термоэлектротренировка (ТЭТ). Приборы устанавливались на пассивный радиатор и тренировались при постоянной накачке током 150 мА и комнатной температуре окружающей среды в течение месяца. После каждого этапа измерялись спектральные параметры и выходные мощности излучения.

3. Результаты и их обсуждение

Основные проблемы ВОГ с СЛД в качестве источника излучения связаны с изменением спектра СЛД в зависимости от температуры, а также в процессе наработки. В настоящей работе возможность отказа от принудительной термостабилизации при изготовлении СЛД, работающих в широком диапазоне температур от –55 °С до +70 °С, обусловлена использованием гетероструктуры AlGaInAs/InP с напряженно-компенсированными квантовыми ямами.

На рис.1 приведены зависимости выходной мощности СЛД от температуры окружающей среды при постоянном уровне накачки. Вполне закономерно снижение выходной мощности с ростом температуры $T > -40$ °С, а вот небольшое увеличение выходной мощности с ростом температуры в области низких температур (от –55 °С до –40 °С), вероятнее всего, объясняется разъюстировкой оптического узла СЛД данной конструкции вследствие изменения размеров деталей при изменении температуры. Как видно из рис.1, выходная мощность при постоянной накачке изменяется в очень широких пределах, что может приводить в том числе к увеличению уровня шумов в ВОГ. Дальнейшие измерения проводились в режиме поддержания постоянной выходной мощности на уровне 100 мкВт посредством регулирования тока накачки (рис.2). Очевидно, что с ростом температуры требуется увеличение тока накачки для сохранения заданного уровня выходной мощности.

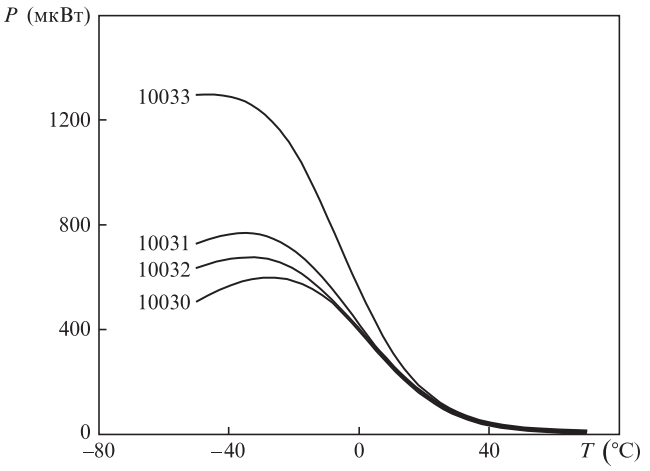

Рис.1. Зависимости выходной мощности СЛД от температуры окружающей среды при постоянной накачке. Цифры у кривых – номера тестируемых образцов СЛД.

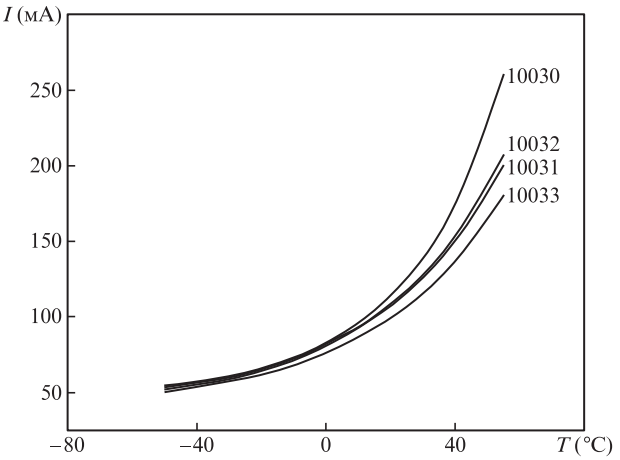

Рис.2. Зависимости тока накачки СЛД от температуры окружающей среды при постоянной выходной мощности 100 мкВт.

На рис.3 представлены зависимости медианной длины волны спектра излучения СЛД от температуры в испытательной камере. Для сравнения для одного из приборов измерения проводились также в режиме постоянной накачки. Видно, что в режиме постоянной выходной мощности исследуемые зависимости практически линейны и характеризуются одинаковым углом наклона, а следовательно, их легко учесть при калибровке выходного сигнала ВОГ в зависимости от температуры.

Полуширина спектра излучения предсказуемо уменьшается с понижениием температуры (рис.4), однако даже при –50 °С она превышает 20 нм, что обеспечивает длину

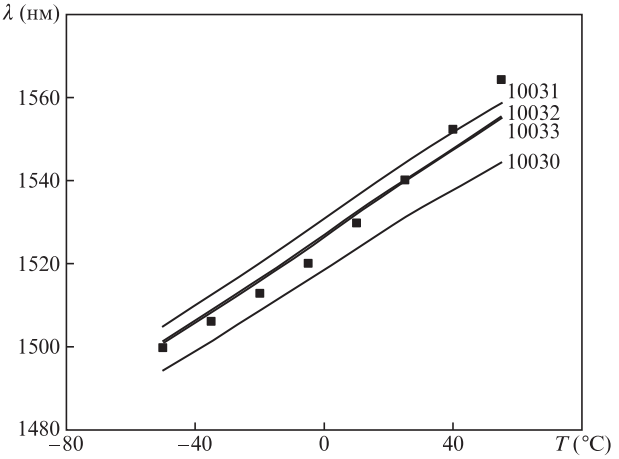

Рис.3. Зависимости медианной длины волны излучения СЛД от температуры окружающей среды при постоянной выходной мощности 100 мкВт, а также аналогичная зависимость для образца 1032 при постоянной накачке (квадраты).

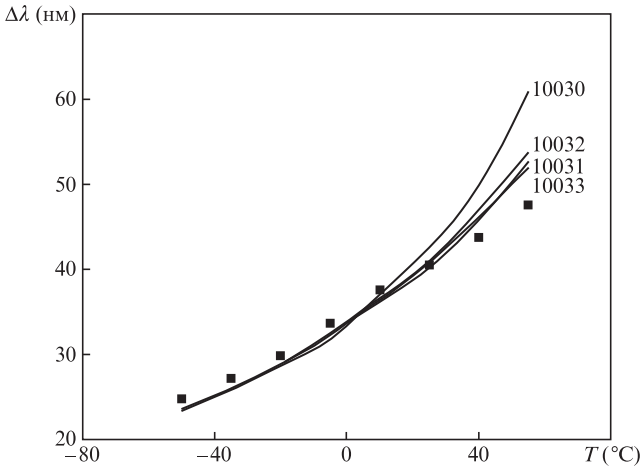

Рис.4. Зависимости полуширины спектра СЛД от температуры окружающей среды при постоянной выходной мощности 100 мкВт. а также аналогичная зависимость для образца 1032 при постоянной накачке (квадраты).

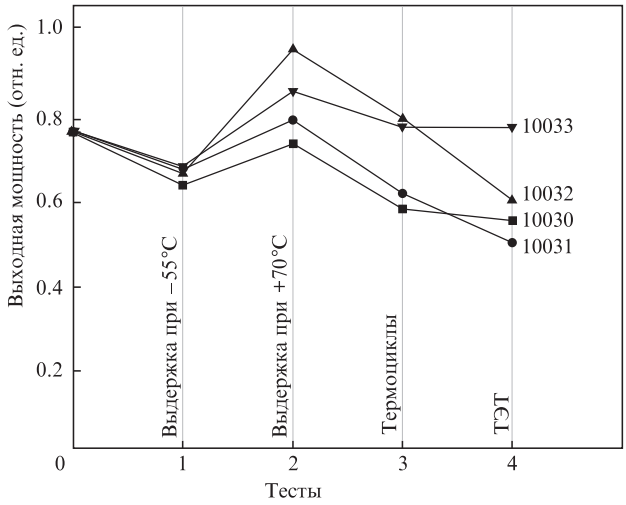

Рис.5. Изменения выходной мощности экспериментальных образцов СЛД при различных испытаниях.

когерентности около 100 мкм и вполне достаточно для минимизации погрешностей ВОГ вследствие паразитных интерференций.

Изменения выходной мощности СЛД в результате тестов надежности показаны на рис.5. При этом спектральные характеристики исследованных образцов практически не изменялись.

Можно видеть, что катастрофической деградации выходной мощности СЛД в ходе тестов не наблюдалось. Однако для уверенности в стабильности выходной мощности в пределах ±10% потребуется дополнительный анализ и доработка конструкции прибора.

4. Заключение

В работе исследованы температурные зависимости выходных параметров, а также надежность экспериментальных неохлаждаемых СЛД на основе гетероструктур AlGaInAs/InP с напряженно-компенсированными квантовыми ямами. Приборы продемонстрировали свою работоспособность в диапазоне температур от −55°C до +70°C, а их выходные характеристики в этих условиях отвечают требованиям, предъявляемым к источникам света для ВОГ.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИОНХ РАН в области фундаментальных научных исследований и программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ (проект №02.a03.21.0005).

1. Андронова И.А., Малыкин Г.Б. *УФН*, **172**, 849 (2002) [*Phys. Usp.*, **45**, 793 (2002)].
2. Nayak J. *Appl. Opt.*, **50**, E152 (2011).
3. Passaro V.M.N., Cuccovillo A., Vaiani L., De Carlo M., Campanella C.E. *Sensors*, **17**, 2284 (2017).
4. Vurgaftman I., Meyer J.R., Ram-Mohan L.R. *J. Appl. Phys.*, **89**, 5815 (2001).
5. Miller B.I., Koren U., Young M.G., Chien M.D. *Appl. Phys. Lett.*, **58**, 1952 (1991).
6. Ogasawara M., Sugiura H., Mitsuhara M., Yamamoto M., Nakao M. *J. Appl. Phys.*, **84**, 4775 (1998).
7. Lui W.W., Yamanaka T., Yoshikuni Y., Seki S., Yokoyama K. *Appl. Phys. Lett.*, **64**, 1475 (1994).
8. Wang J., von Allmen P., Leburton J-P., Linden K.J. *IEEE J. Quantum Electron.*, **31**, 864 (1995).
9. Андреев А.Д., Зегря Г.Г. *ФТП*, **31**, 358 (1997) [*Semiconductors*, **31**, 297 (1997)].
10. Сабитов Д.Р., Рябоштан Ю.Л., Светогоров, В.Н. Падалица А.А., Ладугин М.А., Мармалюк А.А., Васильев М.Г., Васильев А.М., Костин Ю.О., Шелякин А.А. *Квантовая электроника*, **50**, 830 (2020) [*Quantum Electron.*, **50**, 830 (2020)].