

Суперлюминесцентные диоды спектрального диапазона 1.5–1.6 мкм на основе напряженно-компенсированных квантовых ям AlGaInAs/InP

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

Исследованы суперлюминесцентные диоды, созданные на основе двойных гетероструктур отдельного ограничения AlGaInAs/InP с напряженно-компенсированными квантовыми ямами. Проанализировано влияние введения упругих напряжений в активную область на выходные характеристики приборов. Показано, что такая конструкция суперлюминесцентного диода позволяет обеспечить оптическую мощность более 5 мВт на выходе одномодового волоконного световода, ширину спектра излучения более 60 нм, степень поляризации выходного излучения до 30 дБ и имеет большие возможности дальнейшего улучшения.

Ключевые слова: суперлюминесцентный диод, квантовая яма, компенсация упругих напряжений, AlGaInAs/InP.

1. Введение

В настоящее время все более широкое применение находят суперлюминесцентные диоды (СЛД) – полупроводниковые источники низкокогерентного излучения с повышенной яркостью и широкой спектральной линией. Для ряда практических приложений помимо высокой выходной мощности требуется работоспособность СЛД при повышенных температурах и зачастую увеличенная ширина их спектра. Особенную сложность представляет создание таких приборов с длиной волны излучения 1.4–1.6 мкм, поскольку, в отличие от излучателей ближнего ИК диапазона (0.8–1.0 мкм), для рассматриваемого спектрального диапазона характерна повышенная интенсивность протекания процессов оже-рекомбинации, что ухудшает внешнюю квантовую эффективность, снижает уровень максимально достижимой выходной мощности и обуславливает высокую температурную зависимость выходных характеристик излучателей. Негативная роль этого процесса отмечалась многими исследователями при создании лазерных диодов (ЛД) этого спектрального диапазона [1–5]. Характерной особенностью СЛД является высокая концентрация носителей заряда в активной области, особенно в предельных режимах эксплуатации, что делает процессы оже-рекомбинации более вероятными.

Традиционно СЛД спектрального диапазона 1.5–1.6 мкм базируются на двойной гетероструктуре отдельного ограничения GaInAsP/InP с объемным слоем

[6–8] или квантовыми ямами (КЯ) в активной области [9–11]. Вариация параметров КЯ позволяет получать широкую спектральную линию (100–200 нм) излучения [12, 13]. Вместе с тем существует потребность в приборах с увеличенной выходной мощностью, повышенной рабочей температурой и высокой степенью поляризации излучения. Такие параметры могут быть достигнуты при использовании гетероструктур на основе AlGaInAs/InP, которые хорошо зарекомендовали себя при создании ЛД спектрального диапазона 1.3–1.55 мкм повышенной мощности и температурной стабильности. Так, за счет улучшения электронного ограничения в КЯ AlGaInAs удалось увеличить квантовую эффективность и предельную рабочую температуру ЛД [1, 14, 15]. Использование напряженной активной области в ЛД этого типа позволяет снизить влияние процессов оже-рекомбинации и способствует улучшению их выходных характеристик [16–18]. Естественным ограничением величины допустимых упругих напряжений является генерация дислокаций несоответствия. Отодвинуть границу образования кристаллических дефектов возможно путем использования напряженно-компенсированных квантовых ям, когда упругие напряжения в слое КЯ компенсируются напряжениями противоположного знака в слое барьера [19, 20]. ЛД на основе напряженно-компенсированных КЯ продемонстрировали улучшенные рабочие характеристики [21–23]. Следует отметить, что возможность формирования напряженно-компенсированной активной области в значительной мере зависит не только от параметров (толщины и состава) слоев, но и от условий их получения. Настоящая работа посвящена использованию гетероструктур AlGaInAs/InP с напряженно-компенсированной активной областью для создания СЛД спектрального диапазона 1.5–1.6 мкм.

2. Экспериментальная часть

СЛД формировались на основе двойных гетероструктур отдельного ограничения AlGaInAs/InP методом МОС-гидридной эпитаксии. Гетероструктура AlGaInAs/InP содержала активную область на основе нескольких КЯ.

Д.Р.Сабитов, Ю.Л.Рябоштан, В.Н.Светогоров, А.А.Падалица, М.А.Ладугин. ООО «Сигм плюс», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3; e-mail: D.Sabitov@splus.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 1 июня 2020 г., после доработки – 19 июня 2020 г.

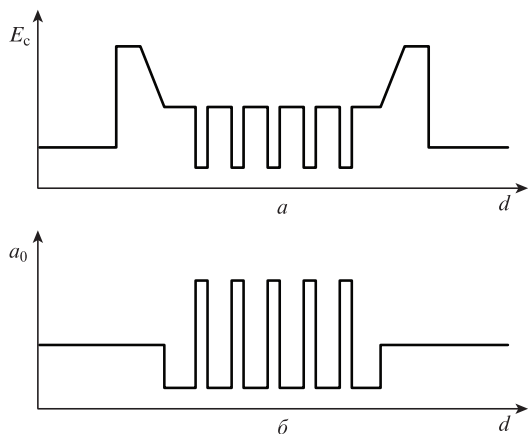


Рис. 1. Схематическое изображение зоны проводимости E_c (a) и периода кристаллической решетки a_0 (б) активной области СЛД (d – толщина активной области).

Геометрия активной области подбиралась таким образом, чтобы максимум излучения находился в спектральном диапазоне 1.5–1.6 мкм. Уровень вводимых упругих напряжений противоположного знака в КЯ (напряжения сжатия, $\epsilon_{QW} = +1.4\%$) и барьере (напряжения растяжения, $\epsilon_{bar} = -0.4\%$) рассчитывался с точки зрения увеличения оптического усиления при сохранении высокого кристаллического совершенства, что подтверждалось достижением максимальной интенсивности сигнала фотolumинесценции образцов. Схематические изображения зоны проводимости активной области СЛД и периодов кристаллической решетки составляющих ее слоев приведены на рис. 1.

Для низкокогерентных источников излучения критически важным является получение минимального уровня паразитной модуляции выходного сигнала резонансами Фабри–Перо, что требует максимально возможного подавления положительной оптической обратной связи. С этой целью нами использовалась близкая к описанной в [10] конструкция СЛД, включающая прямой наклоненный к грани активный канал, антиотражающие покрытия граней и клиновидный поглотитель излучения на нерабочем торце кристалла. Изготовленные чипы монтировались р-стороной вверх на медный теплоотвод, который, в свою очередь, устанавливался в стандартный корпус DBUT с термозащитным элементом Пельтье. Излучение СЛД вводилось в одномодовый волоконный световод типа «Панда» при помощи торцевой микролинзы. Измерения характеристик проводились в непрерывном режиме при различных температурах с помощью драйвера Maiman SF8150.

3. Результаты и их обсуждение

Типичные вольт-амперные и ватт-амперные характеристики СЛД, созданных на основе гетероструктур AlGaInAs/InP с напряженно-компенсированными квантовыми ямами, при различных температурах стабилизации приведены на рис. 2. Рабочее напряжение составляло, как правило, 1.5–1.8 В. Оптическая мощность измерялась на выходе одномодового волоконного световода. При комнатной температуре приборы излучают до 5 мВт мощности, что достаточно для различных практических применений [24]. С повышением температуры квантовая эффективность излучателя снижается и выходная мощ-

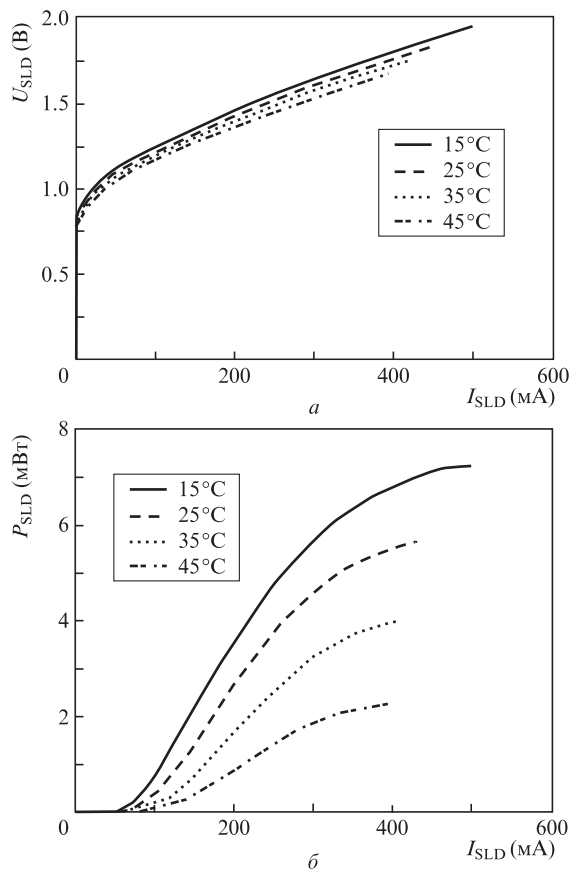


Рис. 2. Вольт-амперные (a) и ватт-амперные (б) характеристики СЛД, измеренные при различных температурах стабилизации.

ность закономерно падает. Тем не менее при температуре 45°C выходная мощность достигает 2 мВт, что позволяет использовать СЛД для решения многих задач без использования принудительной термостабилизации. Так, в работе [25] отмечается, что СЛД с мощностью на выходе одномодового световода ~ 0.1 мВт востребованы для световых модулей, работающих в широком температурном диапазоне без термостабилизации.

На рис. 3 показана эволюция спектра излучения СЛД с ростом уровня накачки. Увеличение плотности тока приводит к незначительному смещению максимума и увеличению ширины спектра излучения на уровне 0.5, что сле-

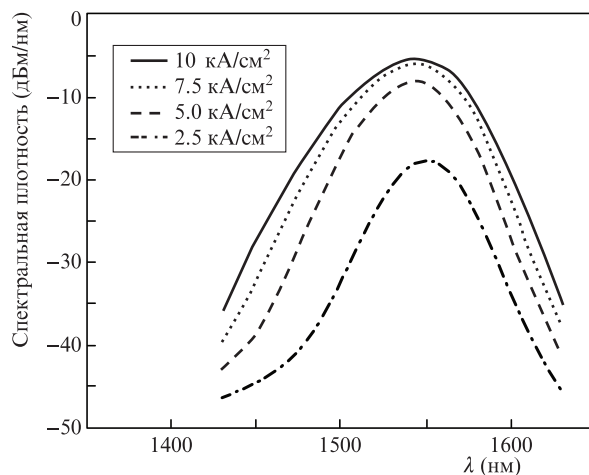


Рис. 3. Эволюция спектральной характеристики СЛД в зависимости от плотности тока накачки.

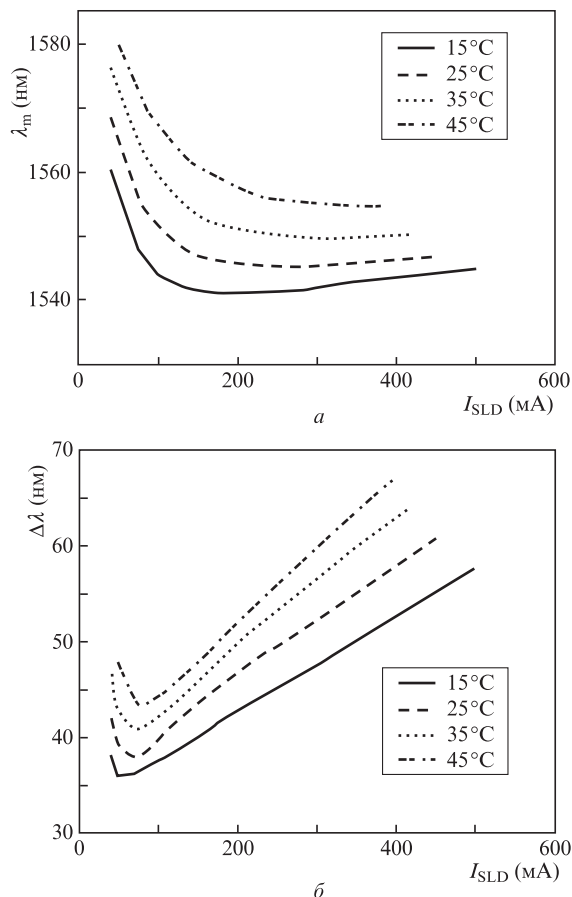


Рис.4. Зависимости длины волны излучения (а) и ширины спектра (б) СЛД от тока накачки при различных температурах.

дует учитывать при конструировании приборов с заданным спектром излучения при определенной оптической или потребляемой мощности. Более подробно изменение спектра при различных температурах стабилизации показано на рис.4. Видно, что при токах накачки свыше 200 мА длина волны максимума спектра излучения изменяется мало, а его полуширина продолжает увеличиваться и достигает 60–70 нм.

Предпринятые меры по подавлению оптической обратной связи позволили снизить амплитуду паразитной модуляции спектра излучения до уровня 0.15 дБ во всем диапазоне рабочих токов накачки. Участок спектральной кривой вблизи максимума интенсивности, снятый с высоким разрешением для оценки глубины модуляции, представлен на рис.5.

Анализ температурных зависимостей выходных параметров показывает возможность использования разработанных СЛД в корпусах без элемента Пельтье при выходной мощности излучения ~ 100 мкВт. Излучатели с такими характеристиками могут быть востребованы, например, при производстве миниатюрных оптических гироскопов, где важны небольшие размеры и низкая стоимость конечного изделия при обеспечении необходимой мощности и стабильности длины волны источников.

Степень поляризации излучения на выходе однододового световода определялась при помощи измерителя поляризационной экстинкции Santec PEM-330. Известно, что переход от объемной активной области к квантово-размерной способствует повышению поляризационной экстинкции излучения (ТЕ/ТМ) за счет разделения легких и

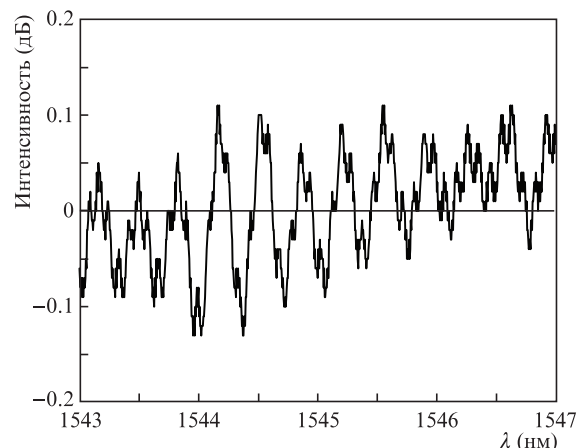


Рис.5. Участок спектральной кривой, снятый с высоким разрешением вблизи максимума линии излучения.

тяжелых дырок [9]. Типичное значение этого параметра для СЛД на основе КЯ рассматриваемого спектрального диапазона составляет 10–20 дБ. Снижение уровня упругих напряжений в квантовых ямах, например, при введении барьеров (или использовании КЯ) с напряжениями противоположных знаков способствует понижению данного соотношения и получению поляризационно-независимых СЛД и полупроводниковых оптических усилителей [26–28]. В настоящей работе, напротив, упругие напряжения в квантовых ямах были увеличены с тем, чтобы поляризационная экстинкция излучения возросла и составила 25–30 дБ.

4. Заключение

Изучены выходные характеристики СЛД на основе гетероструктуры AlGaInAs/InP. Показано, что использование напряженно-компенсированных квантовых ям в активной области обеспечивает возможность создания СЛД с мощностью более 5 мВт на выходе однододового волоконного световода, полушириной спектра 50–70 нм и степенью поляризации выходного излучения 25–30 дБ. Отмечено, что использование таких гетероструктур позволяет создавать СЛД с удачным набором эксплуатационных характеристик для различных практических приложений. Дальнейшие исследования будут посвящены изучению надежности разработанных СЛД. Представляет также интерес исследование СЛД на основе гетероструктуры AlGaInAs/InP с активной областью, состоящей из КЯ, различных по толщине и составу, что должно позволить увеличить ширину спектра излучения (по аналогии с работой [29]).

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ (дог. №02.a03.21.0005), Программы Президиума РАН «Научные основы создания новых функциональных материалов» (Программа I.15.1).

1. Zah C.-E., Bhat R., Pathak B.N., Favire F., Lin W., Wang M.C., Andreadakis N.C., Hwang D.M., Koza M.A., Lee T.-P., Wang Z., Darby D., Flanders D., Hsieh J.J. *IEEE J. Quantum Electron.*, **30** (2), 511 (1994).
2. Minch J., Park S.H., Keating T., Chuang S.L. *IEEE J. Quantum Electron.*, **35**, 771 (1999).
3. Piprek J., Kenton White J., SpringThorpe A.J. *IEEE J. Quantum Electron.*, **38**, 1253 (2002).

4. Лютецкий А.В., Борщёв К.С., Пихтин Н.А., Слипченко С.О., Соколова З.Н., Тарасов И.С. *ФТП*, **42**, 106 (2008) [*Semiconductors*, **42**, 104 (2008)].
5. Веселов Д.А., Аюшева К.Р., Шашкин И.С., Бахвалов К.В., Васильева В.В., Вавилова Л.С., Лютецкий А.В., Пихтин Н.А., Слипченко С.О., Соколова З.Н., Тарасов И.С. *Квантовая электроника*, **45**, 879 (2015) [*Quantum Electron.*, **45**, 879 (2015)].
6. Noguchi Y., Yasaka H., Mikami O., Nagai H. *J. Appl. Phys.*, **67**, 2665 (1990).
7. Пихтин Н.А., Ильин Ю.В., Лешко А.Ю., Лютецкий А.В., Станкевич А.Л., Тарасов И.С., Фетисова Н.В. *Письма в ЖТФ*, **15**, 16 (1999) [*Tech. Phys. Lett.*, **25**, 598 (1999)].
8. Wang S., Wang W., Zhu H., Zhao L., Zhang R., Zhou F., Shu H., Wang R. *J. Cryst. Growth*, **260**, 464 (2004).
9. Kondo S., Yasaka H., Noguchi Y., Magari K., Sugo M., Mikami O. *Electron. Lett.*, **28** (2), 132 (1992).
10. Song J.H., Cho S.H., Han I.K., Hu Y., Heim P.J.S., Johnson F.G., Stone D.R., Dagenais M. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **12**, 783 (2000).
11. Мамедов Д.С., Прохоров В.В., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **33**, 511 (2003) [*Quantum Electron.*, **33**, 511 (2003)].
12. Lin C.-F., Wu B.-R., Lai H.-W., Shih T.-T. *Opt. Lett.*, **26**, 1099 (2001).
13. Lin C.-F., Su Y.-S., Wu C.-H., Shmavonyan G.S. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **16**, 1441 (2004).
14. Голикова Е.Г., Курешов В.А., Лешко А.Ю., Лившиц Д.А., Лютецкий А.В., Николаев Д.Н., Пихтин Н.А., Рябоштан Ю.Л., Слипченко С.О., Тарасов И.С., Фетисова Н.В. *Письма в ЖТФ*, **26**, 40 (2000) [*Tech. Phys. Lett.*, **26**, 913 (2000)].
15. Zhang Y., Chen W., Wang A., Jiang H., Liu C., Liu S. *IEEE J. Quantum Electron.*, **37**, 923 (2001).
16. Lui W.W., Yamanaka T., Yoshikuni Y., Seki S., Yokoyama K. *Appl. Phys. Lett.*, **64**, 1475 (1994).
17. Wang J., von Allmen P., Leburton J.-P., Linden K.J. *IEEE J. Quantum Electron.*, **31**, 864 (1995).
18. Андреев А.Д., Зеря Г.Г. *ФТП*, **31**, 358 (1997) [*Semiconductors*, **31**, 297 (1997)].
19. Miller B.I., Koren U., Young M.G., Chien M.D. *Appl. Phys. Lett.*, **58**, 1952 (1991).
20. Ogasawara M., Sugiura H., Mitsuhara M., Yamamoto M., Nakao M. *J. Appl. Phys.*, **84**, 4775 (1998).
21. Lin C.-C., Liu K.-S., Wu M.-C., Shiao H.-P. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **37**, 3309 (1998).
22. Pan J.-W., Chen M.-H., Chyi J.-I. *J. Cryst. Growth*, **201/202**, 923 (1999).
23. Wu M.-Y., Yang C.-D., Lei P.-H., Wu M.-C., Ho W.-J. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **42**, L643 (2003).
24. *Handbook of Optical Fiber Sensing Technology*. Ed. by J.M. López-Higuera (New York: John Wiley & Sons Ltd, 2002).
25. Мамедов Д.С., Прохоров В.В., Шраменко М.В., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **32**, 593 (2002) [*Quantum Electron.*, **32**, 593 (2002)].
26. Mikami O., Noguchi Y., Magari K., Suzuki Y. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **4** (7), 703 (1991).
27. Newkirk M.A., Miller B.I., Koren U., Young M.G., Chien M., Jopson R.M., Burrus C.A. *IEEE Photon. Tech. Lett.*, **4**, 406 (1993).
28. Silver M., Phillips A.F., Adams A.R., Greene P.D., Collas A.J. *IEEE J. Quantum Electron.*, **36**, 118 (2000).
29. Андреева Е.В., Ильченко С.Н., Ладугин М.А., Мармалюк А.А., Панкратов К.М., Шидловский В.Р., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **49**, 931 (2019) [*Quantum Electron.*, **49**, 931 (2019)].