

**Колодезный Е.С.¹, Курочкин А.С.^{1,2}, Егоров А.Ю.¹, Михайлов А.К.^{1,3},
Карачинский Л.Я.², Новиков И.И.², Бабичев А.В.², Гладышев А.Г.²,
Гаджиев И.М.^{1,4}, Ильинская Н.Д.⁴, Буяло М.С.^{1,4}, Бугров В.Е.¹**

¹Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет

информационных технологий, механики и оптики

²ООО «Коннектор Оптикс»

³Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ»

⁴Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН

Полупроводниковые лазерные диоды спектрального диапазона 1520–1580 нм для радиофотоники и телекоммуникаций

Методом молекулярно-пучковой эпитаксии изготовлены гетероструктуры с различным несоответствием между параметрами кристаллической решетки слоев квантовых ям InGaAs и параметром кристаллической решетки подложки InP. Максимальное относительное несоответствие составило +2 %. Оптические свойства гетероструктур InGaAlAs/InGaAs/InP были исследованы методом фотолюминесценции. Из созданных гетероструктур были изготовлены лазеры полосковой конструкции со следующими характеристиками: минимальное значение пороговой плотности тока составило 1660 А/см², максимальное модальное оптическое усиление составило более 175 см⁻¹ и минимальное значение тока прозрачности лазера составило 46 А/см².

Ключевые слова: радиофотоника, лазерный диод, молекулярно-пучковая эпитаксия, гетероструктура, квантовая яма, напряжения несоответствия.

Полупроводниковые лазерные диоды (ЛД) с длиной волны излучения 1550 нм широко применяются в цифровых телекоммуникационных системах [1] и достаточно хорошо изучены [2–4]. При использовании ЛД в радиофотонике для оптической обработки аналоговых сверхвысокочастотных сигналов возникла потребность в разработке гетероструктур с повышенной частотой прямой токовой модуляции [5]. Актуальность разработки радиофотонных систем определяется тем, что в ряде случаев отказаться от аналоговых сигналов невозможно (радиолокация, телеметрия, линии задержки и др.). В работе [6] было показано, что использование в ЛД механически напряженных квантовых ям (КЯ) должно приводить к увеличению дифференциального усиления и, как следствие, увеличивать полосу модуляции, кроме того было показано, что частоту прямой токовой модуляции можно увеличить, уменьшив объём оптической моды [7]. Важным преимуществом использования механически напряженных КЯ является наличие только одного уровня размерного квантования электронов, что положительно влияет на динамику захвата электронов на основной уровень, кроме того при фиксированных барьерах в узких КЯ растет плотность состояний, что также должно приводить к росту оптического усиления.

Использование гетероструктур твердых растворов InGaAs и InGaAlAs, обладающих возможностью создания большего ограничения электронов в КЯ, подходит для реализации

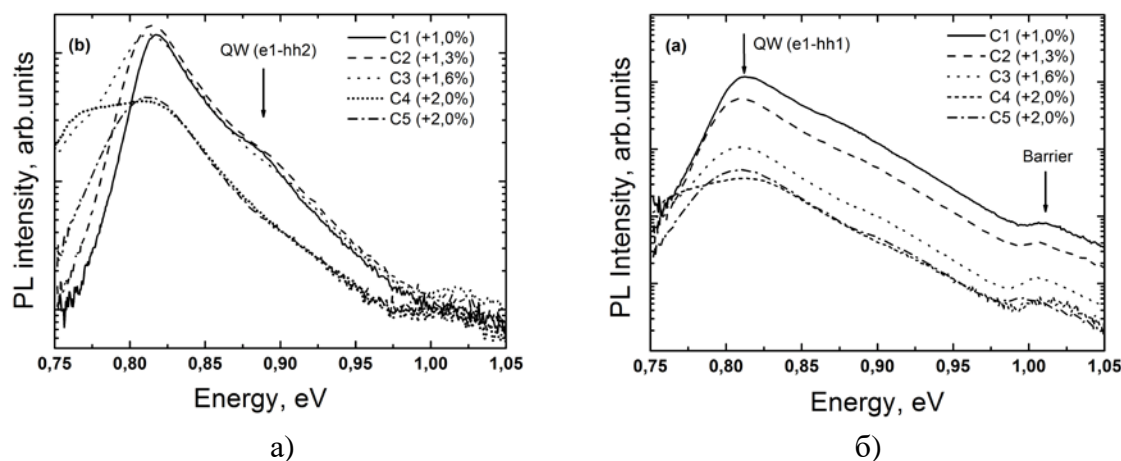
ЛД с повышенной температурной стабильностью порогового тока лазерной генерации. Возможность изготовления механически напряженных слоев КЯ с относительным несоответствием параметров кристаллической решетки вплоть до +2 % позволяет дополнительно увеличить дифференциальное усиление лазерных диодов [8,9]. Одновременно использование гетеропары InAlAs/InGaAs дает возможность реализовать гетероструктуры с большим контрастом показателя преломления на гетерограницах по сравнению с традиционно используемой гетеропарой InGaAsP/InP [2,10].

Методом молекулярно-пучковой эпитаксии на промышленной установке Riber MBE49 (компания ООО «Коннектор Оптикс») был выращен набор гетероструктур на подложках из InP (100) с несоответствием кристаллических решеток +1,0%, +1,3%, +1,6% и +2,0%. Состав, толщины, относительное несоответствие слоев КЯ и результаты исследования методом фотолюминесценции (ФЛ) выращенных гетероструктур приведены в таблице 1.

Табл. 1. Описание экспериментальных образцов и данные измерений их свойств.

№	Материал КЯ	Количество КЯ	Толщина барьера/КЯ, нм	Несоответствие, %	Максимум ФЛ, нм	Ширина ФЛ, мэВ
C1	In _{0,67} Ga _{0,33} As	5	10,0/3,2	+1,0	1519	25
C2	In _{0,72} Ga _{0,28} As	5	10,0/2,7	+1,3	1521	31
C3	In _{0,76} Ga _{0,24} As	5	10,0/2,5	+1,6	1524	43
C4	In _{0,82} Ga _{0,18} As	5	10,0/1,9	+2,0	1526	345
C5	In _{0,82} Ga _{0,18} As	4	10,0/1,9	+2,0	1523	50

На рисунке 1 представлены спектры ФЛ созданных гетероструктур.



(а) – при плотности мощности возбуждающего лазера 580 Вт/см²;

(б) – при плотности мощности возбуждающего лазера 58 Вт/см²;

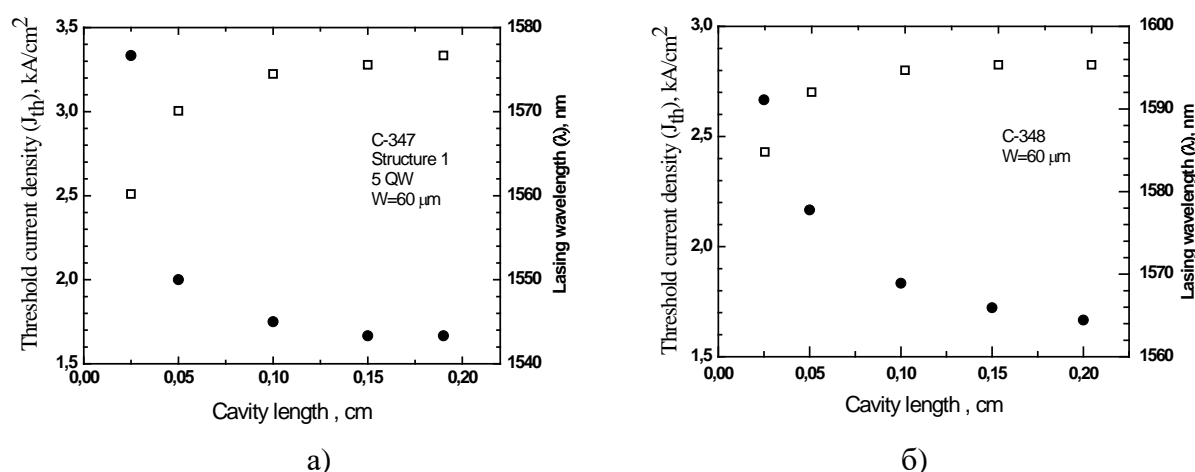
Рис. 1. Спектры фотолюминесценции гетероструктур C1–C5

Все образцы удовлетворяют заданному диапазону длин волн и демонстрируют достаточно высокую интенсивность ФЛ. Ширина пиков ФЛ на полувысоте имеет

тенденцию к постепенному увеличению по мере увеличения параметра несоответствия, что может быть объяснено развитием морфологии поверхности и/или возникновением в слоях КЯ самоорганизующихся областей, обогащенных индием. Полуширина пика ФЛ при плотности мощности возбуждающего лазера 6.5 Вт/см^2 составила 25, 31, 43 и 50 мэВ для образцов С1, С2, С3 и С5, соответственно. В спектре ФЛ образца С3 наблюдается низкоэнергетическая затяжка, которая в образце С4 трансформируется в дополнительный отдельный длинноволновый пик. Обнаруженные особенности, по предположению, связаны с приближением для образца С3 (5 КЯ, +1,6%) и превышением в образце С4 (5 КЯ, +2,0%) критической величины упругого напряжения и резким усилением эффекта возникновения в слоях КЯ самоорганизующихся областей, обогащенных индием, особенно для случая, когда несоответствие составляет +2,0%. Это предположение подтверждается тем фактом, что в образце С5, аналогичном образцу С4, но с четырьмя КЯ, указанная особенность на спектре ФЛ не наблюдалась.

Для исследования характеристик оптического усиления созданных активных областей были изготовлены две лазерные гетероструктуры, содержащие 5 (Структура 1) и 8 (Структура 2) КЯ $\text{In}_{0,67}\text{Ga}_{0,33}\text{As}$, разделенных барьерами $\text{In}_{0,53}\text{Al}_{0,20}\text{Ga}_{0,27}\text{As}$, и аналогичных активной области С1 из Таблицы 1. Ширина волновода составляла 0,6 мкм, при этом области толщиной 0,1 мкм, прилегающие к эмиттерным слоям, были легированы до уровня 10^{18} для сглаживания эффекта границы гетероперехода (уменьшения сопротивления). Эмиттеры InAlAs , согласованные по параметру решётки с InP , толщиной 2 мкм (р-эмиттер) и 1 мкм (н-эмиттер) легировались С и Si для достижения концентрации, соответственно, дырок и электронов на уровне $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

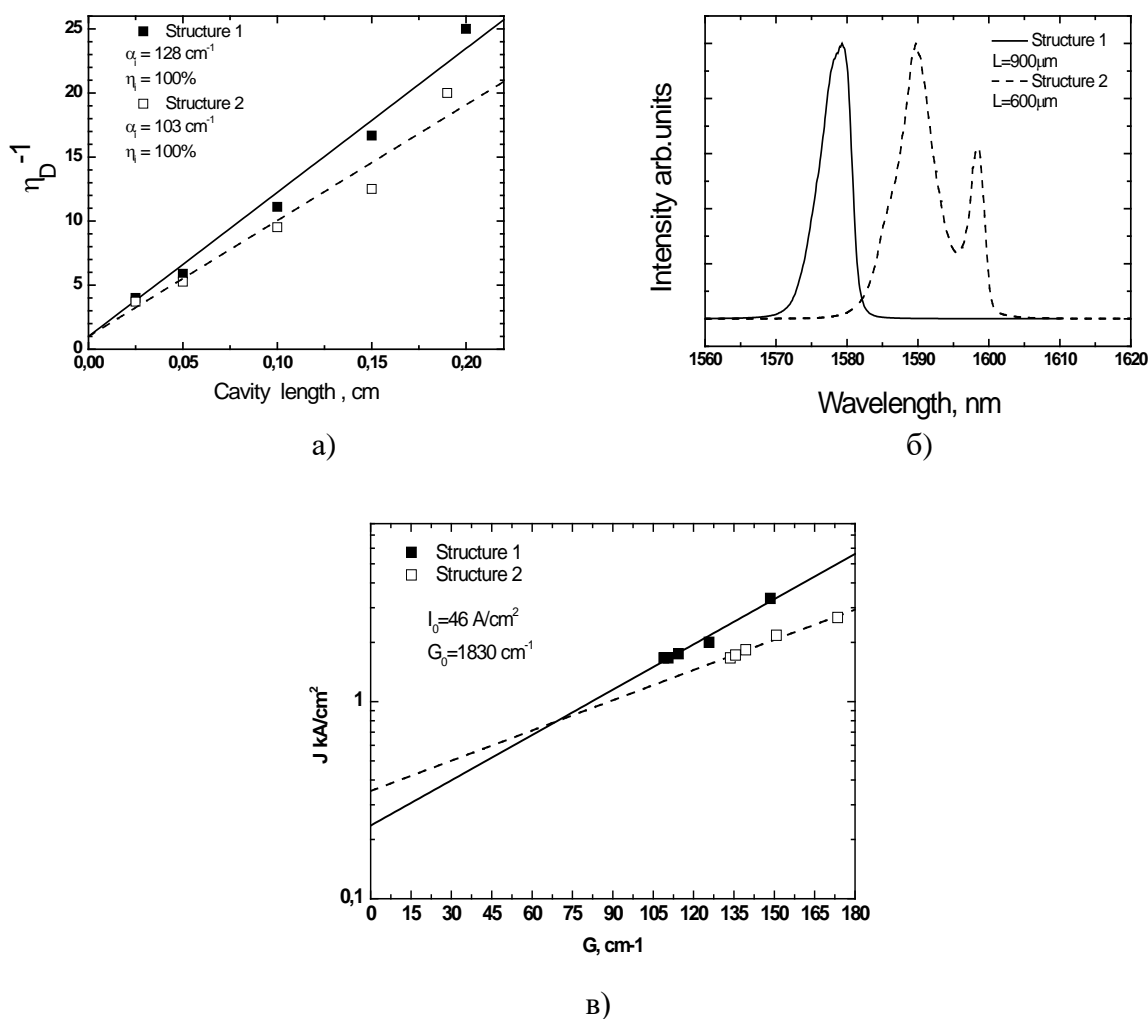
Из выращенных гетероструктур были изготовлены ЛД полосковой конструкции с шириной полоска 60 мкм в геометрии мелкой мезы с различной длиной резонатора. На зеркала резонатора, полученные скалыванием, просветляющие и отражающие покрытия не наносились. Образцы крепились на медный теплоотвод эпитаксиальными слоями вниз при помощи индиевого припоя. Приборные характеристики исследовались в при комнатной температуре и при возбуждении импульсами тока длительностью 300 нс частотой 1 кГц. На рисунке 2 представлена зависимость пороговой плотности тока и длины волны лазерной генерации от длины резонатора, минимальное значение пороговой плотности тока составило $\sim 1660 \text{ А/см}^2$.



(а) – Структура с 5 КЯ;
(б) – Структура с 8 КЯ;

Рис. 2. Зависимость пороговой плотности тока и длины волны лазерной генерации от длины резонатора

На рисунке 3 представлены различные характеристики изготовленных образцов. Максимальное значение дифференциальной квантовой эффективности составило 27 % для Структуры 1, внутренние потери составили 103 см^{-1} и 128 см^{-1} для Структуры 1 и Структуры 2 соответственно. Максимальное усиление составило более 175 см^{-1} . Расчетное значение фактора оптического ограничения составляет 0,006% в пересчете на одну КЯ. Можно оценить, что минимальное значение тока прозрачности лазера составляет 46 А/см^2 в пересчете на одну КЯ для Структуры 2, при этом материальное усиление составляет более 1830 см^{-1} .



(а) – зависимость обратной дифференциальной квантовой эффективности от длины резонатора;

(б) – спектры излучения;

(в) – зависимость плотности тока от модального усиления в предположении значения внутренней дифференциальной квантовой эффективности на уровне 100%

Рис. 3. Характеристики лазерного диода

На рисунке 4 представлена зависимость внутренних оптических потерь ЛД от числа КЯ, видно, что потери растут с увеличением числа КЯ, поэтому, изменяя число КЯ, потери могут быть снижены. Важно отметить, что причина больших оптических потерь связана с большим уровнем легирования эмиттеров.

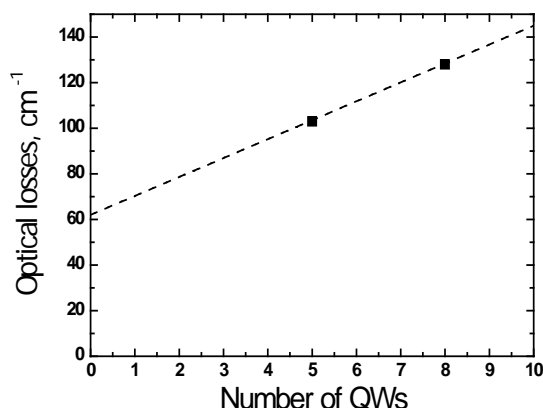


Рис. 4. Зависимость внутренних оптических потерь ЛД от числа КЯ

Таким образом, нами были созданы и исследованы ЛД на основе гетероструктуры InGaAs/InAlGaAs, продемонстрировавшие лазерную генерацию в спектральном диапазоне 1580–1595 нм. Изготовленные лазеры с широким контактом продемонстрировали пороговые плотности тока в пределах 1,5–2,5 кА/см². Показано, что модальное усиление в лазере составляет не менее 175 см⁻¹. Дальнейшая работа по улучшению параметров лазеров связана с оптимизацией профиля легирования гетероструктуры и количества КЯ. В частности, значения пороговой плотности тока могут быть уменьшены до 0,5–0,7 кА/см² за счет уменьшения количества КЯ до 2–3 и уменьшения уровня легирования волновода до $1 \cdot 10^{17}$ см⁻³ и эмиттеров до $1 \cdot 10^{18}$ см⁻³ соответственно.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», шифр 2015-14-582-0038, соглашение № 14.581.21.0013 от 4 августа 2015 г., уникальный идентификатор RFMEFI58115X0013.

Библиографический список

1. Keiser G.E. A Review of WDM Technology and Applications // *Opt. Fiber Technol.* 1999. Vol. 5. P. 3–39.
2. Temkin H., Tanbun-Ek T., Logan R.A. Strained InGaAs/InP quantum well lasers // *Appl. Phys. Lett.* 1990. Vol. 56, № 13. P. 1210–1212.
3. G. Liu S.L.C. High-speed modulation of long-wavelength In_{1-x}Ga_xAs_{1-y}P_y and In_{1-x-y}Ga_xAl_yAs strained quantum-well lasers // *IEEE J. Quantum Electron.* 2001. Vol. 37, № 10. P. 1283–1291.
4. Thijs P. J. A., Dongen L. F., Tiemeijer P. I., Kuindersma J. J., M. Binsma T. Van. High-performance 1.5 μm wavelength InGaAs-InGaAsP strained quantum well lasers and amplifiers // *IEEE J. Quantum Electron.* 1991. Vol. 27, № 6. P. 1426–1439.
5. Iezekiel S. *Microwave photonics: devices and applications.* Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2009.
6. Suemune I. Theoretical study of differential gain in strained quantum well structures // *IEEE J. Quantum Electron.* 1991. Vol. 27, № 5. P. 1149–1159.
7. Vahala K. J. Z.C. Approximate expressions for modulation for performance optimization of biaxially quantum-well lasers // *Appl. Phys. Lett.* 1991. Vol. 59, № 25. P. 3230–3232.
8. Larry A. Coldren, Scott W. Corzine M.L.M. *Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits.* John Wiley & Sons, 2012. 744 p.
9. M. Muller, Garching D, Germany, W. Hofmann, T. Grundl M.H. 1550-nm High-Speed Short-Cavity VCSELs // *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 2011. Vol. 17, № 5. P. 1158–1166.
10. Vurgaftman I., Meyer J.R., Ram-Mohan L.R. Band parameters for III-V compound semiconductors and their alloys // *J. Appl. Phys.* 2001. Vol. 89, № 11. P. 5815–5875.