

Лазерные диоды с несколькими излучающими областями ($\lambda = 800\text{--}1100\text{ нм}$) на основе эпитаксиально-интегрированных гетероструктур

© А.А. Мармалюк[¶], Е.И. Давыдова, М.В. Зверков, В.П. Коняев, В.В. Кричевский, М.А. Ладугин, Е.И. Лебедева, С.В. Петров, С.М. Сапожников, В.А. Симаков, М.Б. Успенский, И.В. Яроцкая, Н.А. Пихтин*, И.С. Тарасов*

Научно-исследовательский институт „Полюс“ им. М.Ф. Стельмаха, 117342 Москва, Россия

* Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Российская академия наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 20 сентября 2010 г. Принята к печати 28 сентября 2010 г.)

Обобщены результаты серии исследований по созданию эпитаксиально-интегрированных гетероструктур InGaAs/AlGaAs и AlGaAs/AlGaAs с несколькими излучающими областями и изучению свойств лазерных диодов на их основе, работающих в спектральных диапазонах $\lambda = 800\text{--}810$, $890\text{--}910$ и $1040\text{--}1060\text{ нм}$. Продемонстрировано, что предложенный подход по интеграции отдельных лазерных структур методом МОС-гидридной эпитаксии успешно работает при создании лазерных диодов широкого спектрального диапазона на основе различных типов гетероструктур. Он позволил эффективно увеличить выходную мощность лазерных диодов практически без изменения их массогабаритных характеристик. Описаны основные достоинства данного подхода, а также его ограничения. Эпитаксиальная интеграция двух лазерных гетероструктур позволила увеличить дифференциальную квантовую эффективность в 1.7–2.0 раза, а интеграция трех лазерных гетероструктур — в 2.5–3.0 раза.

1. Введение

Одним из перспективных способов увеличения выходной мощности лазерных диодов (ЛД) является формирование многослойных последовательно интегрированных структур. Он реализуется путем создания прибора в виде монолитной каскадной гетероструктуры (ГС) с несколькими излучающими областями, выращенной в едином эпитаксиальном процессе. Интеграция отдельных лазерных структур осуществляется посредством туннельных переходов [1–5]. Принцип работы приборов данного типа подробно обсуждался ранее [2,4].

Эпитаксиальная интеграция ГС позволяет увеличить дифференциальную квантовую эффективность ЛД пропорционально количеству излучающих областей, обеспечить параллельность пучков излучения, существенно сократить расстояние между излучающими областями, снизить последовательное сопротивление приборов. Наряду с перечисленными достоинствами данный подход обладает и существенным ограничением, заключающимся в увеличенном тепловыделении нескольких близко расположенных излучающих областей по сравнению с традиционными ЛД с одной излучающей областью. Это может приводить к значительному перегреву эпитаксиально-интегрированных ЛД, что предопределило их эффективное использование, как правило, в импульсном и квазинепрерывном режимах работы [4,6–9].

Исторически первые эпитаксиально-интегрированные лазерные ГС были получены методом молекулярно-лучевой и химико-лучевой эпитаксии [1–3]. Совершен-

ствование технологии МОС-гидридной эпитаксии сделало возможным использование этого метода для выращивания указанных ГС высокого качества [4–10].

В [4,6] было показано, что процесс создания указанных многослойных ГС осложнен необходимостью в одном ростовом процессе сформировать эпитаксиальные слои нескольких различных материалов высокого качества. Оптимальные режимы роста для каждого из материалов достаточно сильно различаются [11], поэтому актуально стоит задача определения ростовых параметров, позволяющих обеспечить высокое качество многослойных квантово-размерных ГС в целом.

Данная работа обобщает результаты серии исследований по созданию эпитаксиально-интегрированных ГС различного типа и изучению свойств ЛД на их основе, излучающих в спектральных диапазонах $\lambda = 800\text{--}810$, $890\text{--}910$ и $1040\text{--}1060\text{ нм}$.

2. Экспериментальная часть

Квантово-размерные лазерные ГС InGaAs/AlGaAs и AlGaAs/AlGaAs с одной, двумя и тремя излучающими областями были выращены методом МОС-гидридной эпитаксии. Температура роста изменялась от 550 до 770°C , давление в реакторе поддерживалось в диапазоне $60\text{--}80\text{ мм рт.ст.}$ Источниками элементов третьей группы были триметилалюминий, триэтилгаллий и триметилиндий, источником элементов пятой группы 100% арсин. В качестве лигатуры n - и p -типа использовалась смесь силана с водородом и тетрахлорид углерода, соответственно. Газом-носителем являлся водород.

[¶] E-mail: A.Marmalyuk@siplu.ru

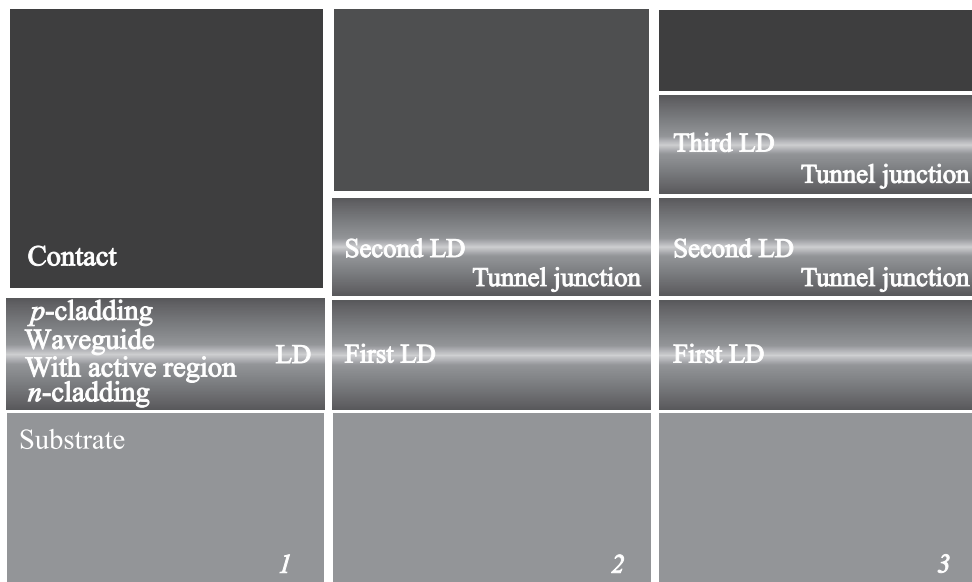


Рис. 1. Микрофотография скола гетероструктуры с одной (1), двумя (2) и тремя (3) излучающими областями.

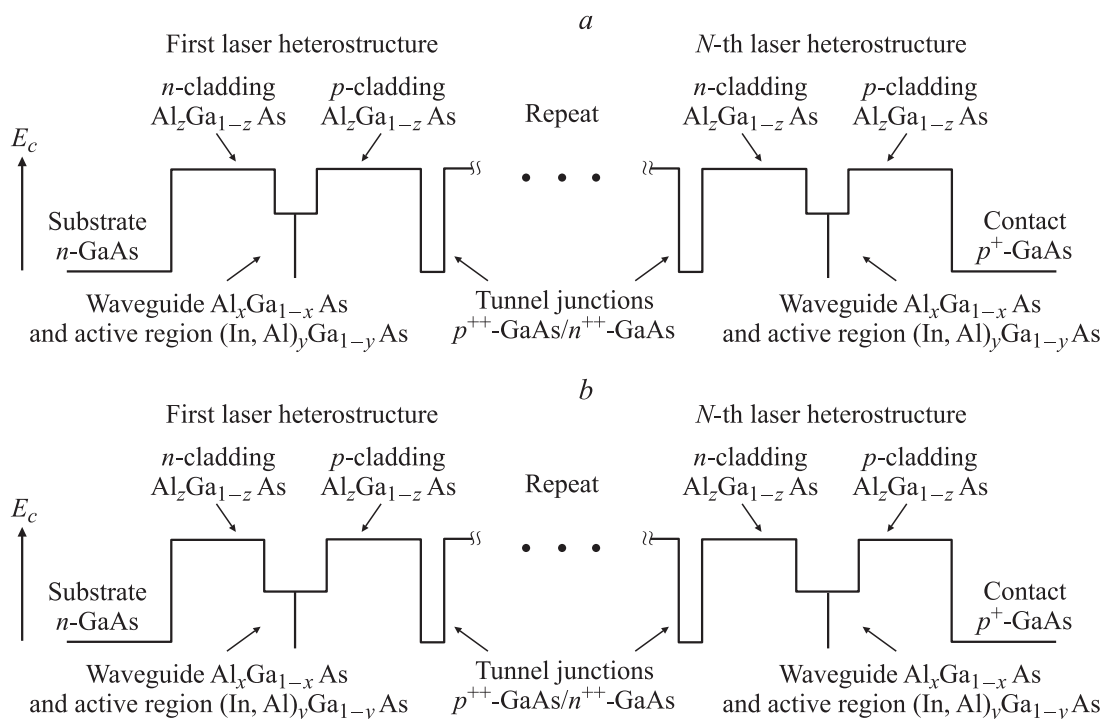


Рис. 2. Схематичное изображение зоны проводимости эпитаксиально-интегрированной гетероструктуры InGaAs/AlGaAs/GaAs с несколькими излучающими областями: *a* — узкий симметричный волновод, *b* — широкий асимметричный волновод.

Эпитаксиально-интегрированные ГС представляли совокупность нескольких лазерных ГС InGaAs/AlGaAs и AlGaAs/AlGaAs, последовательно выращенных на подложках *n*-GaAs (100). Интеграция (соединение) отдельных лазерных структур осуществлялось посредством сильно легированных туннельных переходов *n*⁺-GaAs:Si/*p*⁺-GaAs:C, особенности получения которых подробно описаны в [12].

Геометрия эпитаксиально-интегрированных лазерных ГС выбиралась таким образом, чтобы, с одной стороны, предотвратить проникновение оптического излучения в сильно легированные слои, в которых происходит его поглощение, а с другой — снизить возможность образования дислокаций несоответствия в эпитаксиальных ГС вследствие возрастания их общей толщины.

Таблица 1. Приборные характеристики одиночных и интегрированных ЛД, изготовленных на основе ГС с узким симметричным волноводом

Номер ГС	Количество ЛД (активных областей)	Количество квантовых ям в активной области	Длина волны излучения, нм	U_0 , В	Наклон ВтАХ (Вт/А)
V-970	1	1	900–910	1.3–1.4	0.93
V-1053	1	1	900–910	1.35–1.4	0.88
V-1297	1	1	900–905	1.35	0.94
V-1129	2	1	895–900	2.7–2.9	1.70
V-1054	2	1	890–905	2.7–2.9	1.73
V-1056	2	1	890–905	2.8	1.85
V-1298	2	2	900–905	2.7–2.8	1.77
V-1299	3	2	900–905	4.0–4.1	2.60
V-1131	3	1	900–905	4.0–4.2	2.52
V-1421	1	2	1050–1060	1.2–1.3	0.93
V-1422	2	2	1055–1065	2.4–2.5	1.72

Микрофотографии сколов ГС с несколькими излучающими секциями приведены на рис. 1. Важно отметить, что общая толщина эпитаксиально-интегрированных ГС, содержащих 3 ЛД, составляла 14–16 мкм, но при этом еще не происходило образования дислокаций несоответствия.

В настоящей работе нами были исследованы два варианта гетероструктур: с узким симметричным и расширенным асимметричным волноводом.

В первом варианте интегрированные ЛД содержали две или три последовательно выращенные симметричные лазерные ГС с узким волноводом, общая толщина которого составляла 0.4–0.5 мкм (рис. 2, *a*). Более подробно геометрия таких ГС описана в [13]. Толщины и составы квантовых ям (КЯ) InGaAs подбирались с учетом обеспечения длины волны генерации интегрированных ЛД в спектральном диапазоне либо $\lambda = 890–910$ нм, либо $\lambda = 1040–1060$ нм.

Во втором варианте для интегрирования были использованы асимметричные ГС с расширенным волноводом. Известно, что использование указанного подхода позволяет снизить оптические потери и увеличить дифференциальную квантовую эффективность и максимально достижимую выходную мощность [14–16]. При создании двух серий эпитаксиально-интегрированных ЛД с длинами волн излучения $\lambda = 890–910$ и $800–810$ нм были использованы асимметричные ГС InGaAs/AlGaAs и AlGaAs/AlGaAs с шириной волновода 1.3–1.4 мкм (рис. 2, *b*).

При проведении исследований также были выращены контрольные одиночные лазерные ГС, имеющие такие же составы и геометрию соответствующих слоев, как и в интегрированных ГС. Это позволило оценить воспроизводимость процессов эпитаксии и провести сравнение режимов работы одиночных и интегрированных ЛД.

При проверках параметров обоих типов эпитаксиально-интегрированных ГС было установлено, что падение напряжения на обратносмещенном туннельном

переходе во всех исследованных образцах составляет около 70 мВ. Это свидетельствует о правильном подборе уровней легирования и толщин переходных контактных слоев.

3. Результаты и обсуждение

На основе разработанных и полученных ГС были изготовлены ЛД с шириной полоскового контакта $w = 100–200$ мкм, длиной резонатора $L = 1–2$ мм, просветляющими и отражающими покрытиями ($R_1 \approx 0.05$, $R_2 \approx 0.95$). Исследуемые образцы монтировались *p*-контактом на поверхность медного хладопровода (контактной пластины), которые затем устанавливались в корпусе излучателя. Измерения параметров ЛД проводились в импульсном режиме при длительностях импульсов тока накачки ~ 100 нс и частоте следования 5–10 кГц.

3.1. Результаты исследования интегрированных ЛД на основе ГС с узким симметричным волноводом

Сначала рассмотрим приборные характеристики ЛД изготовленных на основе ГС InGaAs/AlGaAs с узким симметричным волноводом, излучающих в спектральных диапазонах $\lambda = 890–910$ и $1040–1060$ нм.

На рис. 3 приведены типичные вольт-амперные характеристики (ВАХ) ЛД с разным количеством излучающих областей. При фиксированной величине протекающего тока падение напряжения увеличивалось практически пропорционально количеству интегрированных ЛД. Видно, что эпитаксиальная интеграция ГС обеспечивает эффективное последовательное соединение отдельных ЛД.

Из данных табл. 1 видно, что напряжение отсечки U_0 увеличивается пропорционально количеству интегрированных ЛД вне зависимости от состава активного слоя.

На рис. 4 представлены типичные ватт-амперные характеристики (ВтАХ) интегрированных ЛД с несколькими излучающими областями, работающих в спектраль-

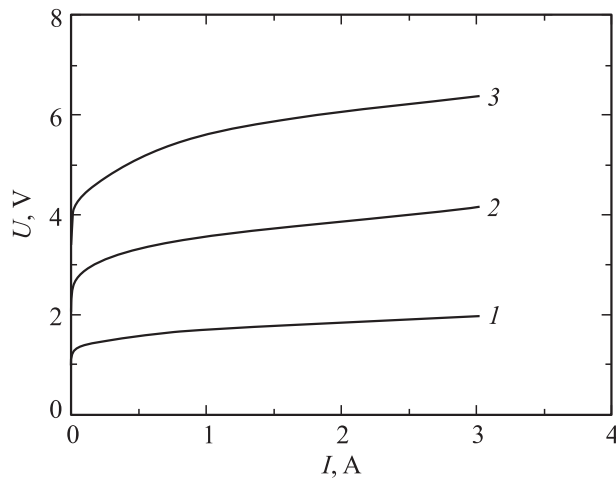


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики лазерных диодов с одной (1), двумя (2) и тремя (3) излучающими областями.

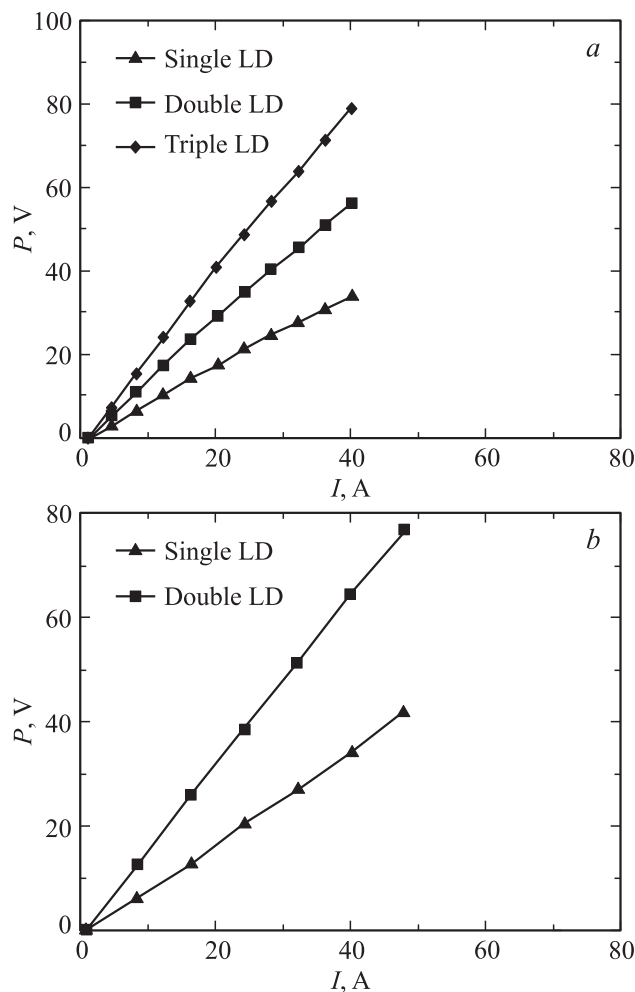


Рис. 4. Ватт-амперные характеристики интегрированных ЛД ($t = 100$ нс, $f = 10$ кГц): *a* — длина волны излучения 900 нм, *b* — длина волны излучения 1050 нм.

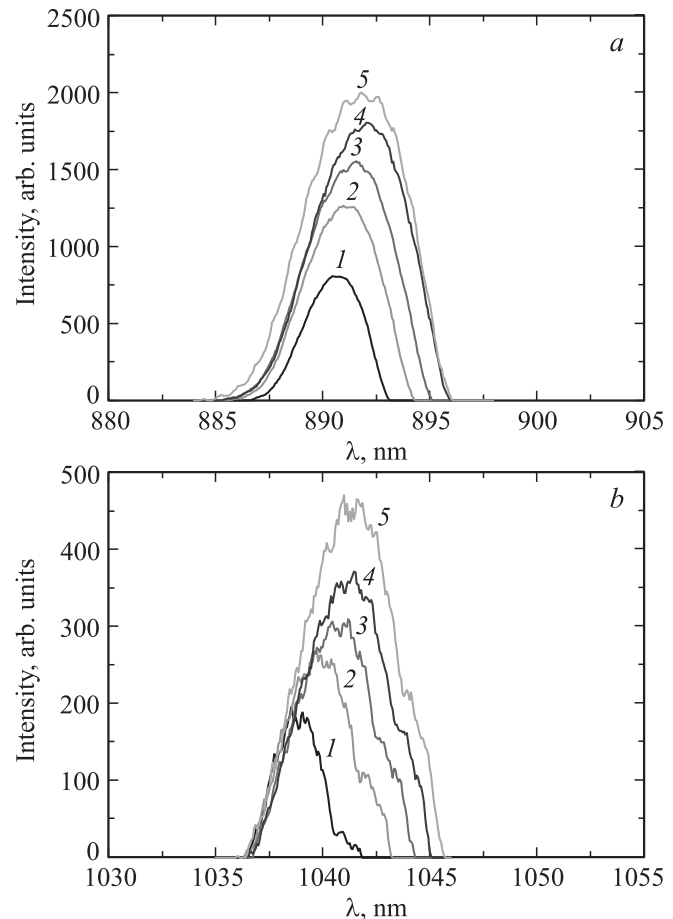


Рис. 5. Зависимость спектра излучения ЛД с двумя излучающими областями от тока импульсной накачки, А: 1 — 10, 2 — 15, 3 — 20, 4 — 25, 5 — 30. *a* — длина волны излучения 900 нм, *b* — длина волны излучения 1050 нм.

ных диапазонах $\lambda = 890$ – 910 и 1040 – 1060 нм. Наклоны ВтАХ приведены в табл. 1.

Пороговые токи I_{th} во всех исследованных ЛД практически не зависели от типа структуры и были равны ~ 1 А. Равенство пороговых токов и линейность ВтАХ в широком диапазоне токов накачки для ЛД с одной, двумя и тремя излучающими областями говорит о достигнутой высокой степени однородности выращенных эпитаксиальных ГС, активные области которых идентичны друг другу.

Дифференциальная эффективность излучения возрастала приблизительно пропорционально количеству интегрированных ЛД и практически не зависела от числа квантовых ям в активной области.

Тепловыделение активных областей ЛД в выбранных режимах токовой накачки было незначительным. Данный вывод вытекает из анализа спектральных характеристик ЛД с двумя излучающими областями, снятых при различных токах накачки (рис. 5, *a*). Спектры излучения интегрированных ЛД имели один максимум. При увеличении тока накачки до 30 А (что соответствовало

средней мощности импульса излучения $P \approx 50$ Вт) длина волны смещалась в длинноволновую область спектра на 2–3 нм. При $d\lambda/dT$, равном 0.3 нм/град, это соответствует увеличению температуры образца примерно на 7–10 град.

С увеличением частоты выходная мощность ЛД с тремя излучающими областями снижается не более чем на 5–7%, тогда как выходная мощность ЛД с одной излучающей областью остается практически неизменной. Хорошие данные были получены и при исследовании влияния температуры на характеристики ЛД (рис. 6). ЛД с одной, двумя и тремя излучающими областями продемонстрировали стабильную работу в широком температурном диапазоне от -60 до $+60^\circ\text{C}$. При повышении температуры от 20 до 60°C снижение средней мощности импульса излучения не превышало 10%.

Аналогичные тепловые характеристики продемонстрировали и ЛД с двумя излучающими областями и длиной волны генерации $\lambda = 1040\text{--}1060$ мкм.

Спектральные характеристики интегрированных ЛД на длину волны $\lambda = 1040\text{--}1060$ мкм также свидетельствовали о близости геометрии КЯ двух излучающих областей (рис. 5, б). Это особенно важно для ГС данного спектрального диапазона, что связано с повышенными требованиями к идентичности КЯ из-за значительных напряжений в КЯ InGaAs/AlGaAs ввиду высокого значения мольной доли InAs в них. Указанные КЯ находятся вблизи границы устойчивости и даже небольшие вариации состава или толщины КЯ могут привести к генерации дислокаций несоответствия. Тем не менее спектры излучения двух активных областей хорошо совпадают, при увеличении тока накачки наблюдается незначительное уширение пика, но без его разделения на два отдельных максимума, что говорит об идентичности КЯ двух излучающих областей.

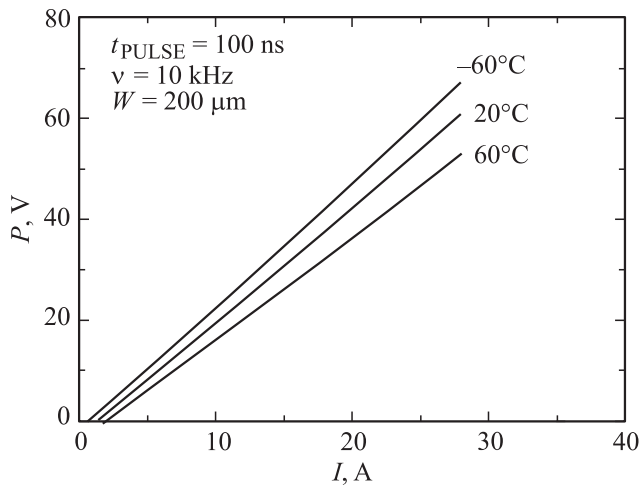


Рис. 6. Зависимость мощности излучения интегрированного ЛД с тремя излучающими областями от тока накачки при различной температуре окружающей среды.

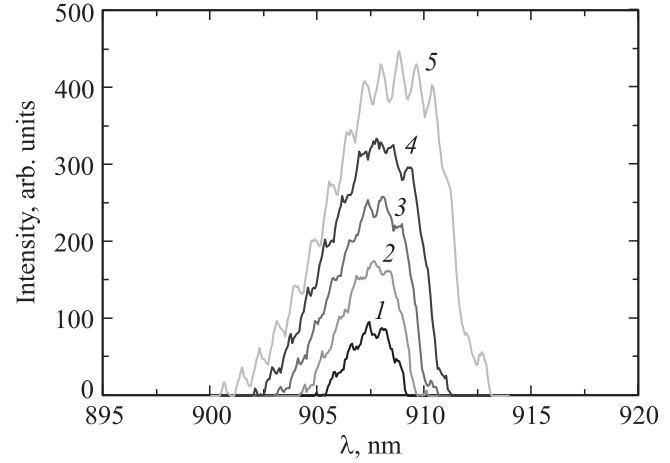


Рис. 7. Спектры излучения интегрированных ЛД на основе асимметричных ГС InGaAs/AlGaAs с расширенным волноводом при различных амплитудах импульсов тока накачки, А: 1 — 10, 2 — 15, 3 — 20, 4 — 25, 5 — 30.

3.2. Результаты исследования интегрированных ЛД на основе ГС с расширенным асимметричным волноводом

Длины волн излучения, напряжения отсечки и наклоны ВтАХ интегрированных ЛД на основе асимметричных ГС с расширенным волноводом приведены в табл. 2. Вольт-амперные характеристики ЛД на основе асимметричных ГС имели такой же вид, как и в случае ЛД на основе симметричных ГС (рис. 2).

Таблица 2. Приборные характеристики одиночных и интегрированных ЛД, изготовленных на основе ГС с расширенным асимметричным волноводом

Номер ГС	Количество ЛД (активных областей)	Длина волны излучения, нм	U_0 , В	Наклон ВтАХ, Вт/А
V-1383	1	895–900	1.35–1.4	1.07
V-1384	2	895–910	2.7–2.8	2.02
V-1392	3	900–915	4.0–4.1	3.00
V-1430	1	800–810	1.4–1.5	1.12
V-1431	2	800–810	3.1–3.2	2.02
V-1432	2	800–810	3.1–3.2	1.98

Как и ожидалось, использование асимметричных гетероструктур с широким волноводом позволило не только снизить оптические потери, но и увеличить дифференциальную квантовую эффективность и максимально достижимую выходную мощность. Наклон кривой на начальном участке ВтАХ достигал 3.0 Вт/А, а средняя мощность импульса излучения интегрированных ЛД с тремя излучающими областями и длиной волны генерации $\lambda = 905\text{--}910$ нм при токе накачки 40 А составляла

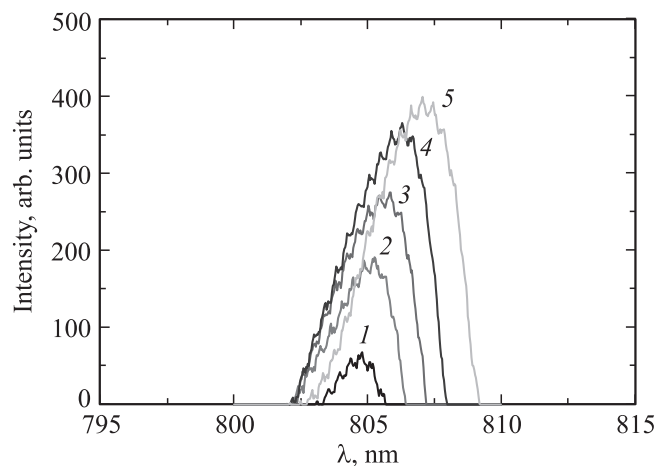


Рис. 8. Спектры излучения интегрированных ЛД на основе асимметричных ГС AlGaAs/AlGaAs с расширенным волноводом при различных амплитудах импульсов тока накачки, А: 1 — 10, 2 — 15, 3 — 20, 4 — 25, 5 — 30.

около 100 Вт. Максимально достижимая мощность при этом превышала 250 Вт, после чего наблюдался тепловой загиб ВтАХ.

Типичные спектры излучения ЛД на основе гетероструктур InGaAs/AlGaAs с расширенным асимметричным волноводом представлены на рис. 7.

Результаты табл. 2 показывают, что разработанные подходы к формированию эпитаксиально-интегрированных ГС в системе материалов InGaAs/AlGaAs позволили также создавать технологию получения эффективных источников излучения и в системе материалов AlGaAs/AlGaAs.

Типичные спектры излучения интегрированных ЛД на спектральный диапазон $\lambda = 800\text{--}810$ нм приведены на рис. 8. Видно, что сдвиг длины волны генерации незначительный, т.е. разогрев активных областей относительно теплоотвода не более 10 К, что близко к значениям, полученным для эпитаксиально-интегрированных ЛД на основе ГС с узким симметричным волноводом.

Подводя итог настоящей работе, можно отметить, что концепция эпитаксиальной интеграции отдельных лазерных структур успешно работает при создании ЛД широкого спектрального диапазона на основе различных типов ГС. Изученный подход позволяет эффективно увеличивать выходную мощность различного типа ЛД практически без изменения их массогабаритных характеристик.

4. Заключение

Таким образом, в работе показано, что благодаря достигнутому уровню технологии выращивания высококачественных эпитаксиальных слоев при помощи метода МОС-гидридной эпитаксии становится возможным формирование эпитаксиально-интегрированных ГС

с несколькими излучающими областями, которые позволяют значительно расширить диапазон выходных характеристик ЛД, созданных на их основе. Продемонстрировано создание таких ЛД, излучающих в спектральных диапазонах 800–810, 890–910 и 1040–1060 нм. Эпитаксиальная интеграция двух лазерных гетероструктур позволяет увеличить дифференциальную квантовую эффективность в 1.7–2.0 раза, а интеграция трех лазерных гетероструктур — в 2.5–3.0 раза.

Список литературы

- [1] J.P. Van der Ziel, W.T. Tsang. Appl. Phys. Lett., **41**, 499 (1982).
- [2] Ch. Garcia, E. Rosencher, Ph. Collet, N. Laurent, J.L. Guyaux, B. Vinter, J. Nagle. Appl. Phys. Lett., **71**, 3752 (1997).
- [3] S.G. Patterson, G.S. Pertich, R.J. Ram, L.A. Kolidziejski. Electron. Lett., **35** (5), 395 (1999).
- [4] М.В. Зверков, В.П. Коняев, В.В. Кричевский, М.А. Ладугин, А.А. Мармалюк, А.А. Падалица, В.А. Симаков, А.В. Сухарев. Квант. электрон., **38**, 989 (2008).
- [5] Д.А. Винокуров, В.П. Коняев, М.А. Ладугин, А.В. Лютецкий, А.А. Мармалюк, А.А. Падалица, А.Н. Петрунов, Н.А. Пихтин, В.А. Симаков, С.О. Слипченко, А.В. Сухарев, Н.В. Фетисова, В.В. Шамахов, И.С. Тарасов. ТФП, **44**, 251 (2009).
- [6] Е.И. Давыдова, М.В. Зверков, В.П. Коняев, В.В. Кричевский, М.А. Ладугин, А.А. Мармалюк, А.А. Падалица, В.А. Симаков, А.В. Сухарев, М.Б. Успенский. Квант. электрон., **39**, 723 (2009).
- [7] C. Hanke, L. Korte, B.D. Acklin, M. Behringer, G. Herrmann, J. Luft, V. DeOdorico, M. Marchiano, J. Wilhelmi. Proc. SPIE, **3947**, 50 (2000).
- [8] G. Shen, P. Lian, X. Guo, T. Yin, C. Chen, T. Wang, J. Du, B. Cui, J. Li, J. Liu, G. Gao, D. Zou, L. Chen. Proc. SPIE, **4225**, 327 (2000).
- [9] R.Q. Yang, Y. Qiu. Appl. Phys. Lett., **83**, 599 (2003).
- [10] M. Behringer, F. Eberhard, G. Herrmann, J. Luft, J. Maric, S. Morgott, M.C. Philippens, W. Teich. Proc. SPIE, **4831**, 4 (2003).
- [11] G.B. Stringfellow. *Organometallic vapor-phase epitaxy: theory and practice*, 2nd ed. (San Diego Academic Press, 1999).
- [12] Д.А. Винокуров, М.А. Ладугин, А.А. Мармалюк, А.А. Падалица, Н.А. Пихтин, В.А. Симаков, А.В. Сухарев, Н.В. Фетисова, В.В. Шамахов, И.С. Тарасов. ФТП, **43**, 1253 (2009).
- [13] П.Б. Булаев, А.А. Мармалюк, А.А. Падалица, Д.Б. Никитин, А.В. Петровский, И.Д. Залевский, В.П. Коняев, В.В. Оськин, М.В. Зверков, В.А. Симаков, Г.М. Зверев. Квант. электрон., **32**, 213 (2002).
- [14] С.О. Слипченко, Н.А. Пихтин, Н.В. Фетисова, М.А. Хомяков, А.А. Мармалюк, Д.Б. Никитин, А.А. Падалица, П.В. Булаев, И.Д. Залевский, И.С. Тарасов. Письма ЖТФ, **29** 26 (2003).
- [15] 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).

- [16] А.Ю. Андреев, А.Ю. Лешко, А.В. Лютецкий, А.А. Мармалюк, Т.А. Налет, А.А. Падалица, Н.А. Пихтин, Д.Р. Сабитов, В.А. Симаков, С.А. Слипченко, М.А. Хомылев, И.С. Тарасов. ФТП, **40**, 628 (2006).

Редактор Л.В. Беляков

Laser diodes with several emitting regions ($\lambda = 800\text{--}1100\text{ nm}$) based on epitaxially-integrated heterostructures

A.A. Marmalyuk, E.I. Davydova, M.V. Zverkov, V.P. Konyaev, V.V. Krichevsky, M.A. Ladugin, E.I. Lebedeva, S.V. Petrov, S.M. Sapozhnikov, V.A. Simakov, M.B. Uspenskiy, I.V. Yarotskaya, N.A. Pikhtin, I.S. Tarasov**

Stel'makh Research and Development

Institute „Polyus“,

117342 Moscow, Russia

* Ioffe Physicotechnical Institute

Russian Academy of Sciences,

194021 St. Petersburg, Russia

Abstract The results of growth the epitaxially-integrated heterostructures InGaAs/AlGaAs and AlGaAs/AlGaAs with several emitting regions have been summarized and the properties of integrated laser diodes operated at $\lambda = 800\text{--}810$, $\lambda = 890\text{--}910$ and $\lambda = 1040\text{--}1060\text{ nm}$ have been studied. It is demonstrated that the approach of integration the individual laser heterostructures by MOVPE work successfully in developing the laser diodes for wide spectral ranges based on different types of structures. It allowed to multiply the output power of laser diodes almost without changing their mass and dimension characteristics. Main advantages of such approach and its deficiency as well have been described. Epitaxial integration of two laser heterostructures resulted in increasing the differential quantum efficiency at 1.7–2.0 times, and integration of three laser heterostructures — at 2.5–3.0 times.