

Решетки лазерных диодов с повышенной мощностью и яркостью импульсного излучения на основе эпитаксиально-интегрированных гетероструктур

© В.П. Коняев, А.А. Мармалюк, М.А. Ладугин, Т.А. Багаев, М.В. Зверков, В.В. Кричевский, А.А. Падалица, С.М. Сапожников, В.А. Симаков

ОАО «НИИ „Полюс“ им. М.Ф. Стельмаха»,
117342 Москва, Россия

(1 июля 2013 г. Принята к печати 16 июня 2013 г.)

В работе приведены результаты исследования одиночных лазерных диодов и решеток спектрального диапазона 900–1060 нм, изготовленных на основе эпитаксиально-интегрированных гетероструктур InGaAs/AlGaAs. Показано, что использование эпитаксиально-интегрированных гетероструктур InGaAs/AlGaAs позволяет создавать лазерные излучатели с повышенной мощностью и яркостью, работающие в режиме коротких импульсов. Приведены результаты исследований характеристик изготовленных из указанных гетероструктур решеток лазерных диодов (РЛД).

1. Введение

В настоящее время полупроводниковые лазерные диоды (ЛД) являются одним из наиболее распространенных источников лазерного излучения. Малые габариты, высокая яркость и КПД, относительно низкое энергопотребление позволяют эффективно использовать ЛД в различных технических областях. Естественно, что в каждом конкретном случае ЛД должен обладать определенной совокупностью характеристик, необходимых для решения поставленной задачи. Однако во всех случаях основными параметрами ЛД являются мощность и длина волны лазерного излучения.

Наиболее перспективным путем повышения мощности излучения ЛД импульсного режима работы является формирование (или интегрирование) в одном кристалле нескольких последовательно выращенных лазерных гетероструктур (ГС), электрический контакт между которыми осуществляется с помощью обратно смещенных туннельных переходов [1–3]. Это позволяет увеличить наклон ватт-амперной характеристики (ВтАХ) излучения по сравнению с обычным ЛД, содержащим одну активную область. Такие интегрированные ЛД (ИЛД) имеют значения средней мощности импульса излучения в несколько десятков Вт при относительно небольших (менее 40 А) амплитудах импульсов тока накачки [2–4]. Использование ГС на основе соединений InGaAs/AlGaAs/GaAs также делает возможным целенаправленное изменение длины волны излучения ИЛД в диапазоне от 900 до 1060 нм [5].

В данной работе продемонстрированы результаты исследований по созданию на основе ИЛД решеток лазерных диодов с повышенной мощностью и яркостью излучения на спектральный диапазон (900–1060) нм.

2. Экспериментальная часть

Эпитаксиально-интегрированные гетероструктуры представляли совокупность нескольких лазерных ГС InGaAs/AlGaAs/GaAs, последовательно выращенных на подложках *n*-GaAs (100) методом МОС-гидридной эпитаксии [2].

Интеграция отдельных ГС осуществлялась посредством сильно легированных туннельных переходов n^+ -GaAs:Si/ p^+ -GaAs:C [6]. Длина волны излучения ИЛД определялась мольной долей InAs в активных слоях ГС, т.е. в квантовых ямах InGaAs. Для создания ИЛД были использованы различные типы ГС с симметричным волноводом [7] и с расширенным асимметричным волноводом [8]. Во всех случаях составы и толщины слоев ГС выбирались таким образом, чтобы на заданной длине волны излучения полуширина диаграммы направленности в плоскости, перпендикулярной слоям, не превышала 30°.

Из полученных ГС формировались ИЛД с шириной межаполоскового контакта 200 мкм и длиной резонатора 1200–1400 мкм, конструкция которых описана в [2–5].

На зеркальные грани полосок с ИЛД наносились многослойные пленочные покрытия, обеспечивающие на заданной длине волны излучения коэффициенты отражения $R_1 \approx 0.03–0.05$ (выходное зеркало) и $R_2 \approx 0.95–0.98$ (задняя зеркальная грань). Далее полоски раскалывались на линейки, содержащие несколько активных элементов.

ИЛД собирались в РЛД и измерялись их выходные характеристики.

3. Результаты

3.1. Излучательные характеристики одиночных интегрированных ЛД

Исследуемые образцы монтировались *p*-контактом на поверхности медного хладопровода (контактной пла-

† E-mail: vpkonyaev@mail.ru

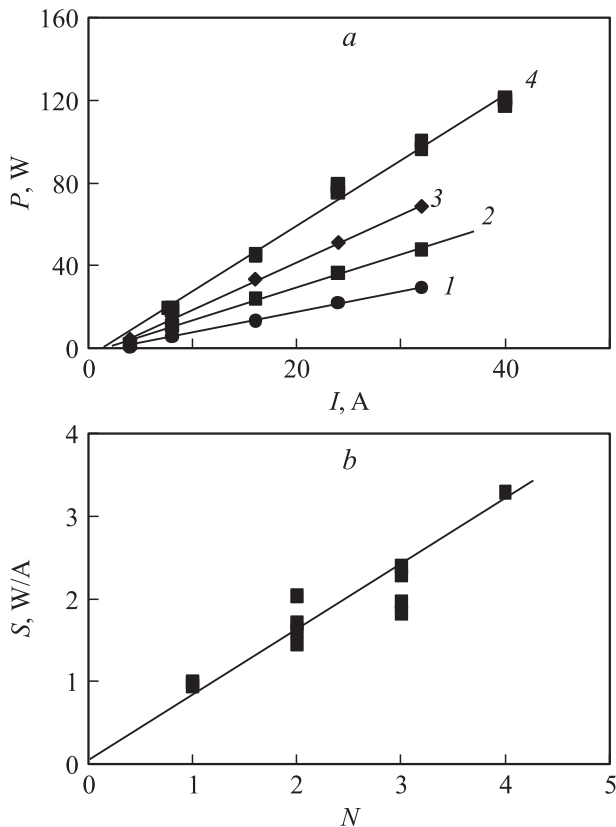


Рис. 1. *a* — ватт-амперные характеристики ИЛД на основе симметричных ГС с разным количеством активных областей: 1 — одна активная область, 2 — две активные области, 3 — три активные области, 4 — четыре активные области ($\lambda = 900$ нм, $F = 10$ кГц, $t_p = 100$ нс). *b* — зависимость наклона ВтАХ S ИЛД на основе симметричных и асимметричных ГС от количества активных областей N .

стине) и далее устанавливались в корпусе излучателя. Измерения параметров ИЛД проводились в импульсном режиме при длительностях импульсов тока накачки $t_p = 90$ – 120 нс с частотой следования $F = 1$ – 20 кГц и при температуре окружающей среды $T = (-60$ – $+75)^\circ\text{C}$.

На рис. 1, *a* представлены ВтАХ ИЛД на основе симметричных ГС. Количество активных областей в исследуемых образцах изменялось от 1 (1ЛД) до 4 (4ЛД). Из результатов, представленных на рис. 1, *b*, видно, что при увеличении количества активных областей в ИЛД наклон ВтАХ монотонно возрастает, причем эта зависимость практически одинакова для обоих типов ГС.

Однако стоит отметить, что с увеличением количества активных областей увеличивалась общая толщина выращенных слоев, что приводило к возникновению механических напряжений и деформации подложки GaAs, на которой сформирована ГС. Это в ряде случаев приводило к разрушению пластины в процессе формирования активных элементов ИЛД. Поэтому в дальнейшем при проведении исследований использовались ГС с 3 активными областями, в которых общая толщина выращенных

слоев еще не приводила к появлению значительных механических напряжений.

На рис. 2 и 3 приведены типичные ВтАХ ИЛД с тремя активными областями (3ЛД), измеренные при разных температурах окружающей среды. Полученные данные показывают, что при интеграции 3 ЛД в одном кристалле не происходит существенного ухудшения тепловых и частотных характеристик активного элемента по сравнению с ЛД, содержащим одну активную область.

Результаты, представленные на рис. 1–3, были получены при исследовании ИЛД с длиной волны генерации 900 нм. Они позволили определить требования к конструкции ГС и активного элемента. При создании ИЛД на длины волн 940–960 и 1030–1060 нм молярная доля InAs в квантово-размерных активных слоях InGaAs ГС была увеличена. При этом составы и геометрия слоев в симметричной и асимметричной ГС корректировались с учетом заданной длины волны излучения для получения полуширины диаграммы направленности не более 30° .

На рис. 4 представлены ВтАХ ИЛД с тремя активными областями и с длинами волн излучения 900, 950 и 1060 нм. Полученные данные показывают, что изменение составов квантово-размерных слоев не оказывает суще-

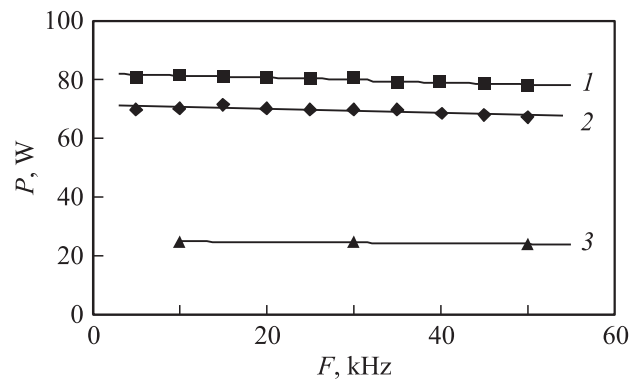


Рис. 2. Зависимость средней мощности импульса P излучения от частоты повторения импульсов тока накачки F : 1 — 3ЛД, асимметричная ГС; 2 — 3ЛД, симметричная ГС; 3 — 1ЛД, симметричная ГС.

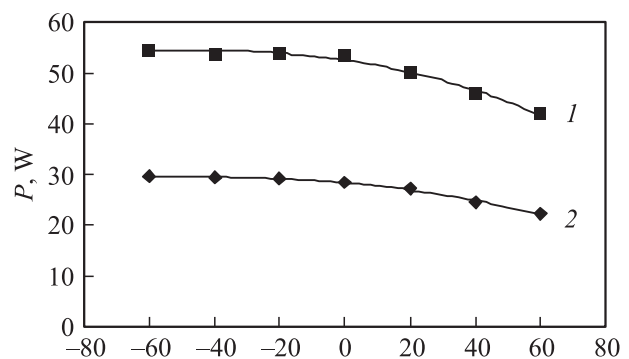


Рис. 3. Зависимости средней мощности импульса P излучения ИЛД с тремя активными областями (3ЛД) от температуры окружающей среды: 1 — ток накачки $I = 24$ А, 2 — ток накачки $I = 14$ А.

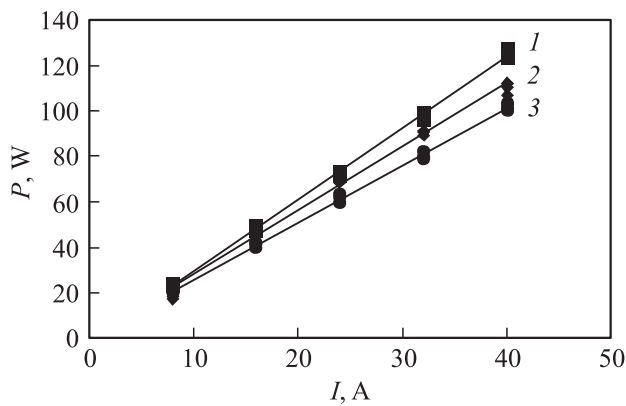


Рис. 4. Зависимости средней мощности импульса P излучения ИЛД с тремя активными областями с разными длинами волн генерации от тока накачки I : 1 — $\lambda = 950$ нм, 2 — $\lambda = 900$ нм, 3 — $\lambda = 1060$ нм.

ственного влияния на наклон ВтАХ. Таким образом, разработанная технология формирования ГС и активного элемента позволяет целенаправленно изменять длину волны излучения ИЛД без ухудшения излучательных параметров активного элемента.

3.2. Излучательные характеристики решеток ЛД на основе интегрированных ГС

Для создания РЛД использовались ГС с тремя активными областями. Количество элементов N в линейке изменялось от 2 до 4, количество линеек M в РЛД варьировалось от 3 до 9. Размеры излучающих поверхностей составляли 0.2–0.7 мм². Измерения параметров РЛД проводились в импульсном режиме при длительностях импульсов тока накачки $t_p = 90$ –120 нс с частотой следования $F = 1$ –20 кГц. Исследования проводились при температуре окружающей среды от минус 60 до 75°С.

ВтАХ РЛД, содержащих по три активных элемента в линейке ($3 \times M$), приведены на рис. 5. Из представленных данных видно, что на начальном участке ВтАХ средняя мощность импульса излучения возрастает линейно с током накачки (рис. 5, *a*) и наклон S ВтАХ определяется количеством M ячеек в РЛД (рис. 5, *b*).

Однако с увеличением тока накачки ВтАХ приобретает нелинейный вид, при этом отклонение ВтАХ от линейной зависимости возрастало при увеличении количества линеек РЛД (рис. 5, *a*). При фиксированной амплитуде импульсов тока это приводило к снижению средней мощности импульса излучения.

На рис. 6 представлены зависимости спектрального максимума излучения РЛД от частоты следования импульсов тока накачки, измеренные на линейном участке ($I = 50$ А) и нелинейном ($I = 80$ А) участке ВтАХ. Полученные данные показывают, что при заданной величине тока накачки максимум длины волны излучения монотонно смещается в длинноволновую область спектра с увеличением частоты повторения импульсов

тока. При этом величина смещения $\Delta\lambda$ возрастает с увеличением тока, и на нелинейном участке ВтАХ значения $\Delta\lambda$ могут достигать величины ~ 20 нм. При $\partial\lambda/\partial T = (0.3-0.35)$ нм/К [9,10] это соответствует увеличению температуры РЛД на 40–50 К относительно температуры теплоотвода.

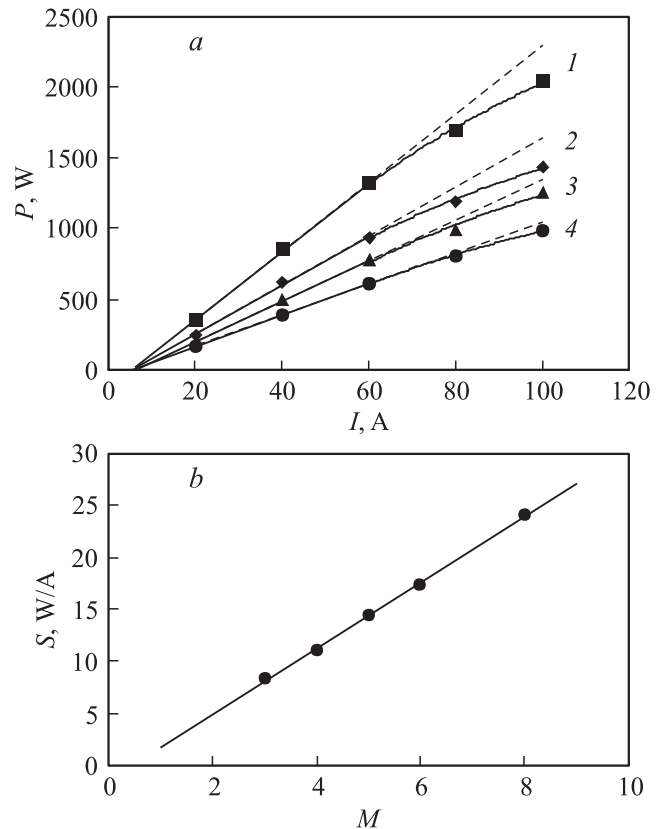


Рис. 5. Ватт-амперные характеристики РЛД с тремя активными элементами в линейке. *a* — зависимость средней мощности импульса излучения P от количества линеек M в РЛД; 1 — 3×8 , 2 — 3×6 , 3 — 3×5 , 4 — 3×4 . *b* — зависимость наклона линейного участка ВтАХ S от количества линеек M в РЛД.

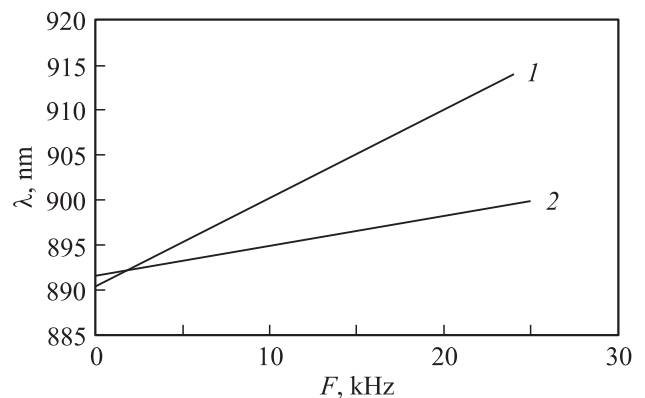


Рис. 6. Зависимости длины волны излучения λ РЛД от частоты F при различной амплитуде импульсов тока накачки I : 1 — 80 А, 2 — 50 А.

Более точные измерения спектров излучения линеек РЛД на линейном участке ВтАХ показали, что по мере удаления от поверхности тепловода происходит монотонное смещение максимума излучения линейки в длинноволновую область. При этом длина волны излучения каждой последующей линейки увеличивается примерно на (1–1.5) нм по сравнению с предыдущей, что соответствует изменению температуры на (2–4) К. Таким образом, увеличение количества линеек M приводит к возрастанию средней мощности импульса излучения, но ограничивает диапазон частот повторения импульсов тока накачки вследствие ухудшения тепловых характеристик сборки РЛД.

На рис. 7 приведены зависимости средней мощности импульса излучения РЛД 3×5 от температуры T и частоты повторения импульсов тока накачки F при разных фиксированных значениях тока накачки I . Из полученных данных видно, что при заданном значении I увеличение T и F приводит к снижению средней мощности импульса излучения. Результаты измерения разных конструкций РЛД в диапазоне температур (25–75)°С

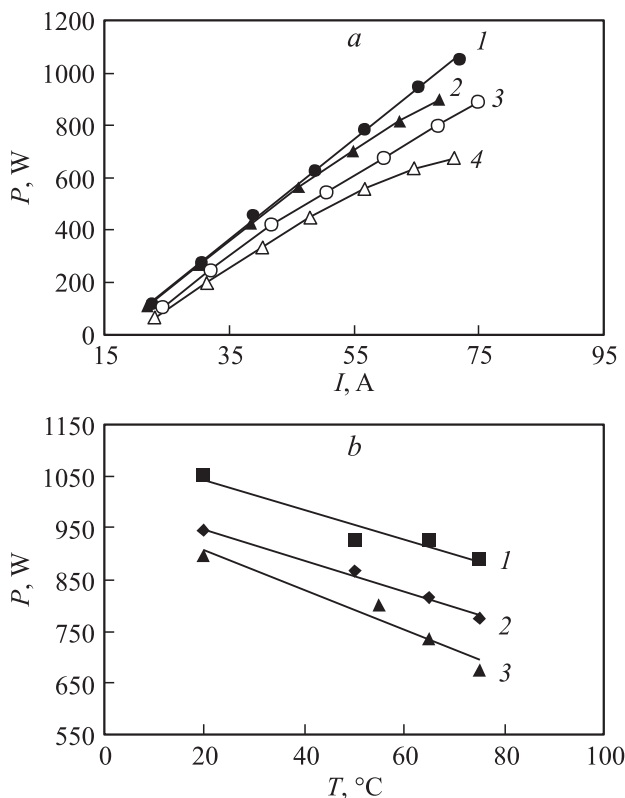


Рис. 7. Температурные характеристики РЛД на основе интегрированных ЛД с тремя активными областями. *a* — зависимость средней мощности импульса P излучения РЛД от тока накачки при различных температурах и частотах повторения импульсов: 1 — 1 кГц, 20°С; 2 — 20 кГц, 20°С; 3 — 1 кГц, 75°С; 4 — 20 кГц, 75°С. *b* — зависимости средней мощности импульса излучения P от температуры при фиксированном токе накачки и различной частоте повторения импульсов: 1 — $F = 1$ кГц, 2 — $F = 10$ кГц, 3 — $F = 20$ кГц.

Параметры излучения РЛД 3×5 ($t_p = 100$ нс, $F = 20$ кГц)

λ , нм	907	908	912	945	945	946	1040	1043	1044
P , Вт	1093	1092	1100	1037	1048	1028	1034	1035	1030
I , А	72	73	67	61	65	63	79	81	79

показали, что при изменении F от 1 до 20 кГц средняя мощность импульса излучения снижается на (15–20)%, что подтверждает хорошие частотные и температурные характеристики ИЛД, используемых для создания решеток.

Диаграммы направленности разных конструкций РЛД в плоскости, перпендикулярной активному слою ИЛД, содержали один максимум, полуширина диаграммы направленности FWHM соответствовала расходимости излучения одиночных ИЛД, входящих в состав РЛД. Значения FWHM не превышали 30° и хорошо согласовывались с результатами расчета, проведенного с использованием геометрии и составов слоев исходных ГС.

В таблице приведены данные измерений РЛД, изготовленных на основе интегрированных ГС с тремя активными областями и с разными длинами волн излучения. РЛД содержали по 5 линеек по 3 активных элемента в каждой. Частота повторения и длительность импульсов тока накачки были соответственно 20 кГц и 100 нс. Полученные результаты показывают возможность создания РЛД на спектральный диапазон 900–1060 нм со средней мощностью импульса излучения ~ 1000 Вт.

Исследования ресурсных характеристик РЛД проводились при температуре окружающей среды 60°С и амплитуде импульсов тока накачки, соответствующей мощности излучения 1000 Вт при комнатной температуре. Частота следования импульсов тока накачки была 5 кГц. После наработки 10^{10} импульсов снижение мощности излучения испытываемых РЛД составляло не более 10% от начального значения, как при температуре испытаний, так и при комнатной температуре.

Эпитаксиальная интеграция отдельных излучающих областей в рамках одной ГС оказалась эффективным путем создания лазерных излучателей с повышенной мощностью и яркостью, работающих в режиме коротких импульсов. Показана применимость данного подхода на примере эпитаксиально-интегрированных гетероструктур InGaAs/AlGaAs по созданию РЛД на основе ИЛД в диапазоне длин волн $\lambda = 900$ –1060 нм со средней мощностью импульса излучения более 1 кВт.

Список литературы

- [1] J.Ch. Garcia, E. Rosencher, Ph. Collot, N. Laurent, J.L. Guyaux, B. Vinter, J. Nagle. Appl. Phys. Lett., **71**, 3752 (1997).
- [2] 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** (11), 989 (2008).
- [3] 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** (8), 723 (2009).
- [4] 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. ФТП, **44**, 251 (2010).
- [5] А.А. Мармалюк, Е.И. Давыдова, М.В. Зверков, В.П. Коняев, В.В. Кричевский, М.А. Ладугин, Е.И. Лебедева, С.В. Петров, И.В. Сапожников, В.А. Симаков, М.Б. Успенский, И.В. Яроцкая, Н.А. Пихтин, И.С. Тарасов. ФТП, **45**, 528 (2011).
- [6] Д.А. Винокуров, М.А. Ладугин, А.А. Мармалюк, А.А. Падалица, Н.А. Пихтин, А.В. Сухарев, И.С. Тарасов, Н.В. Фетисова, В.В. Шамахов. ФТП, **43**, 1253 (2009).
- [7] 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** (3), 213 (2002).
- [8] С.О. Слипченко, Д.А. Винокуров, Н.А. Пихтин, З.Н. Соколова, А.Л. Станкевич, И.С. Тарасов, Ж.И. Алферов. ФТП, **38**, 1477 (2004).
- [9] I. Vurgaftman, J.R. Meyer, L.R. Ram-Mohan. J. Appl. Phys., **89**, 5815 (2001).
- [10] J.R. Botha, A.W.R. Leitch. J. Electron. Mater., **29** (12), 1362 (2000).

Редактор Т.А. Полянская

Laser diodes arrays based on epitaxial integrated heterostructures with increased power and pulsed emission bright

*V.P. Konyaev, A.A. Marmalyuk, M.A. Ladugin,
T.A. Bagaev, M.V. Zverkov, V.V. Krichevsky,
A.A. Paalitsa, S.M. Sapozhnikov, V.A. Simakov*

R&D Institute „Polyus“ named after M.F. Stelmakh
117342 Moscow, Russia

Abstract The results of the study of single laser diodes and arrays spectral range of 900–1060 nm fabricated using integrated epitaxial heterostructures InGaAs/AlGaAs. It is shown that the use of integrated epitaxial heterostructures InGaAs/AlGaAs laser emitters working in short pulses can create with increased power and brightness. Laser diodes arrays characteristics studies results made of these heterostructures are presented.