

# Мощные линейки лазерных диодов на основе квантоворазмерных гетероструктур (Al)GaAs/AlGaAs/GaAs и GaAsP/GaInP/GaAs

Н.В.Гультиков, К.Ю.Телегин, А.Ю.Андреев, Л.И.Шестаков,  
В.А.Панарин, М.Ю.Старьнин, А.А.Мармалюк, М.А.Ладугин

Представлены теоретические и экспериментальные результаты сравнения мощных лазерных линеек спектрального диапазона 800–810 нм, изготовленных на основе гетероструктур (Al)GaAs/AlGaAs и GaAsP/GaInP. Лучшие результаты были продемонстрированы для линеек на основе гетероструктур GaAsP/GaInP. Максимальные значения выходной оптической мощности лазерных линеек длиной 1 см в квазинепрерывном режиме накачки достигли 370–380 Вт. Обсуждается возможная причина различия выходных мощностей линеек на основе исследуемых систем материалов и приведены способы дальнейшего увеличения мощности излучения.

**Ключевые слова:** мощные линейки лазерных диодов, безалюминиевая гетероструктура.

## 1. Введение

Полупроводниковые линейки лазерных диодов (ЛЛД), работающие в спектральном диапазоне 800–810 нм, актуальны в таких практических приложениях, как накачка твердотельных лазеров в системах технологической обработки материалов, медицина, аддитивные технологии и др. [1, 2].

Известно, что для повышения предельных мощностных параметров лазерных диодов целесообразно применение квантоворазмерных гетероструктур (ГС) с расширенным волноводом, т. к. увеличение толщины волноводных слоев позволяет увеличить площадь светового пятна и, как результат, снизить оптическую нагрузку на выходном зеркале [3, 4]. Например, в [5] показано, что увеличение толщины волноводных слоев ГС на основе AlGaAs/GaAs в три раза позволило повысить выходную мощность лазерного диода примерно в полтора раза. Однако в ряде работ установлено, что значительное расширение волновода (более 1.5 мкм) существенно ухудшает температурную стабильность порогового тока и дифференциальную эффективность лазера, а также увеличивает электрическое и тепловое сопротивления ГС [6–7].

Для изготовления мощных ЛЛД в настоящее время наибольшее распространение получили ГС на основе двух систем материалов – (Al)GaAs/AlGaAs/GaAs (Al-содержащая ГС) [7–9] и GaAsP/GaInP/GaAs (безалюминиевая ГС) [10, 11], конструкции которых схематично представлены на рис. 1.

Первая, классическая, система материалов является хорошо изученной с точки зрения управления зонной

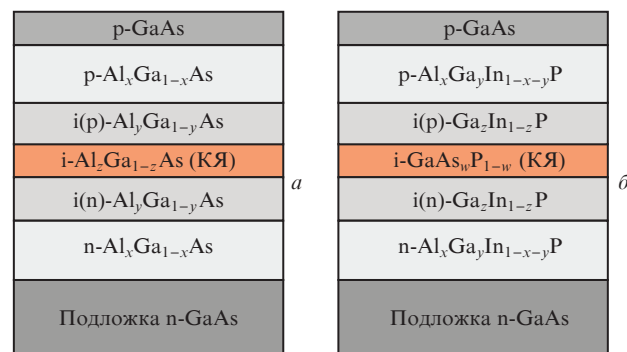


Рис. 1. Конструкции исследуемых гетероструктур AlGaAs/GaAs (а) и GaAsP/GaInP (б).

диаграммой, технологически отработанной и удобной для современных эпитаксиальных нанотехнологий [12]. Преимуществами Al-содержащих ГС является малое расхождение параметров кристаллических решеток и возможность варьировать состав твердого раствора AlGaAs (и, как следствие, управлять шириной запрещенной зоны и показателем преломления), используя только элементы третьей группы периодической системы. Кроме того, у Al-содержащей системы материалов больший (в ~2–3 раза) коэффициент теплопроводности, и, как следствие, меньшее (в ~1.5–2 раза) термическое сопротивление лазерной ГС на ее основе [13].

Недостатком же данной ГС является как раз наличие алюминия, который, к сожалению, имеет высокое сродство к кислороду [14]. Повышенное содержание алюминия в активной и волноводной областях может приводить к окислению материала как на этапах его эпитаксиального выращивания и создания лазерных элементов, так и в процессе эксплуатации излучателя. Атомы кислорода, образующие в запрещенной зоне уровни-ловушки, являются центрами безызлучательной рекомбинации, что в конечном счете ухудшает приборные параметры: повышается пороговая плотность тока, снижаются предельная мощность и ресурс работы [15]. Чаще это прояв-

Н.В.Гультиков, К.Ю.Телегин, А.Ю.Андреев, А.А.Мармалюк, М.А.Ладугин. ООО «Сигм Плюс», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3; e-mail: nikita.gultickov@yandex.ru  
Л.И.Шестаков, В.А.Панарин, М.Ю.Старьнин. ООО «НПП «ИнжекТ», Россия, 410033 Саратов, ул. Элмашевская, 3а

Поступила в редакцию 8 мая 2023 г., после доработки – 22 июля 2023 г.

ляется в лазерах, работающих в спектральном диапазоне 700–800 нм, т. к. для обеспечения генерации на таких длинах волн в активную область ГС приходится вводить больше алюминия [16, 17].

В этой связи, благодаря отсутствию алюминия в активной и волноводной областях, вторая система материалов является предпочтительной. Материалам на основе системы без алюминия свойственна меньшая скорость деградации мощностных характеристик [18], однако технология получения данных ГС осложняется рядом явлений: высокой сегрегацией, высокой степенью диффузии индия из волновода в активную область, обменным взаимодействием элементов пятой группы периодической системы на гетерограницах, наличием областей несмешиваемости четверного соединения InGaAsP и упорядочения твердых растворов (Al)GaInP [19–21].

Особенностью системы без алюминия является необходимость учета упругих напряжений в активной области и согласования состава объемных эпитаксиальных слоев с подложкой GaAs. Тщательный выбор технологических режимов получения твердых растворов GaInP и упругих напряжений в квантовой яме (КЯ) GaAsP позволяет снизить плотность порогового тока и увеличить внешнюю дифференциальную эффективность полупроводникового излучателя по сравнению с тем же прибором на основе ненапряженной КЯ AlGaAs, однако неправильный учет упругих напряжений в КЯ может привести к образованию дислокаций несоответствия и к ухудшению мощностных характеристик лазера [22].

Что касается сравнения таких рекомбинационных параметров, как скорость излучательной рекомбинации, рекомбинации Оже и рекомбинации Шоккли–Рида–Холла, то две системы материалов оказываются очень близки. Однако по такому параметру, как скорость поверхностной безызлучательной рекомбинации, системы без алюминия существенно лучше систем с алюминием, т. к. различия достигают 10 и более раз [23, 24].

Несмотря на представленные преимущества и недостатки, в настоящее время практическое применение находят приборы на основе обеих систем материалов [7–11]. Для создания ЛЛД с повышенными мощностными и ресурсными параметрами по-прежнему требуются выбор подходящей системы материалов и разработка более совершенной конструкции и технологии производства исходных гетероструктур и активных лазерных элементов на их основе.

В связи с этим целями настоящей работы было получение гетероструктур (Al)GaAs/AlGaAs/GaAs и GaAsP/GaInP/GaAs и сравнение выходных характеристик квазинепрерывных ЛЛД, изготовленных на их основе.

## 2. Эксперимент

Лазерные ГС с шириной волноводов 0.5–0.7 мкм в системах материалов AlGaAs/GaAs с КЯ (Al)GaAs и GaInP/GaAs с КЯ GaAsP выращивались методом МОС-гидридной эпитаксии на точноориентированных подложках GaAs (100) для ГС AlGaAs/GaAs и на подложках (100), разориентированных на  $9^\circ$  в направлении (111), для ГС GaAsP/GaInP/GaAs с целью подавления эффекта упорядочения. Помимо получения качественного объемного материала волноводных и эмиттерных слоев, особое внимание уделялось резкости гетерограниц в квантоворазмерной области для достижения высокой эф-

фективности излучения и низких электрических и оптических потерь.

Для обеспечения минимального электрического сопротивления формирование омических контактов к р-слою гетероструктуры осуществлялось методом термического напыления пленок Ti/Ni/Au, а к n-подложке – AuGe/Ni/Au. Оптические покрытия ( $R_1 = 5–10\%$ ,  $R_2 = 95–100\%$ ) формировались на гранях резонатора методом электронно-лучевого напыления.

В работе исследовались два типа конструкции ЛЛД – длиной 5 мм (длина резонатора  $L \approx 1$  мм) и 10 мм ( $L \approx 2$  мм). Фактор заполнения для всех ЛЛД находился в районе 80%.

Полученные ЛЛД исследовались при комнатной ( $25^\circ\text{C}$ ) и повышенной ( $55^\circ\text{C}$ ) температурах в квазинепрерывном режиме работы (25 Гц, 250 мкс).

## 3. Результаты и обсуждение

На рис.2 представлены типовые огибающие спектра лазерного излучения для ЛЛД на основе систем с алюминием и без него при двух температурах среды, ток накачки в обоих случаях составлял около 45 А. Сдвиги длин волн излучения ЛЛД при повышении температуры среды оказались примерно сопоставимы, хотя коэффициент  $d\lambda/dT$  для ЛЛД на основе безалюминиевой системы материалов был немного меньше. Меньшее падение относительной интенсивности для ЛЛД на основе системы без алюминия при увеличении температуры до  $55^\circ\text{C}$  говорит о лучшей температурной стабильности выходных характеристик прибора.

При исследовании ватт-амперных характеристик (ВтАХ) измеряемых приборов (рис.3) были обнаружены существенные различия в части предельных мощностных параметров, что было отмечено для двух конструкций ЛЛД ( $1 \times 5$  и  $2 \times 10$  мм). На ВтАХ линеек длиной 5 мм видно, что выходная оптическая мощность ЛЛД на основе Al-содержащей системы материалов начинает насыщаться при 60 Вт, доходит до 80 Вт и резко падает, что свидетельствует о катастрофической оптической деградации излучателя. Однако оптическая мощность для ЛЛД на основе системы без алюминия продолжает возрастать, насыщение начинается при 120 Вт, оптическая

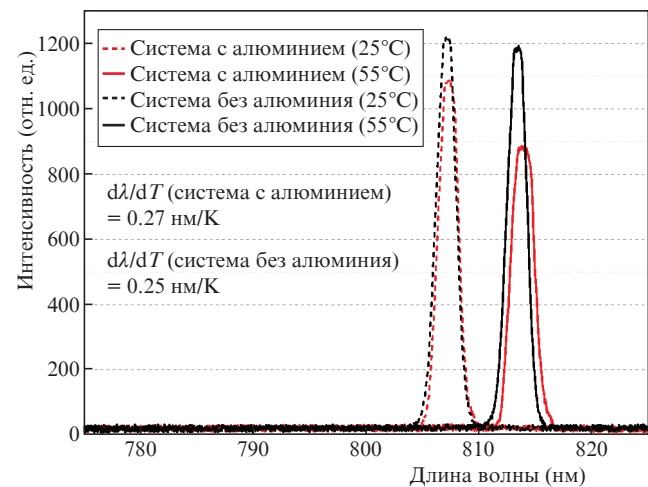


Рис.2. Огибающие спектров излучения для ЛЛД длиной 5 мм на основе системы с алюминием и системы без алюминия при  $25^\circ\text{C}$  и  $55^\circ\text{C}$ .

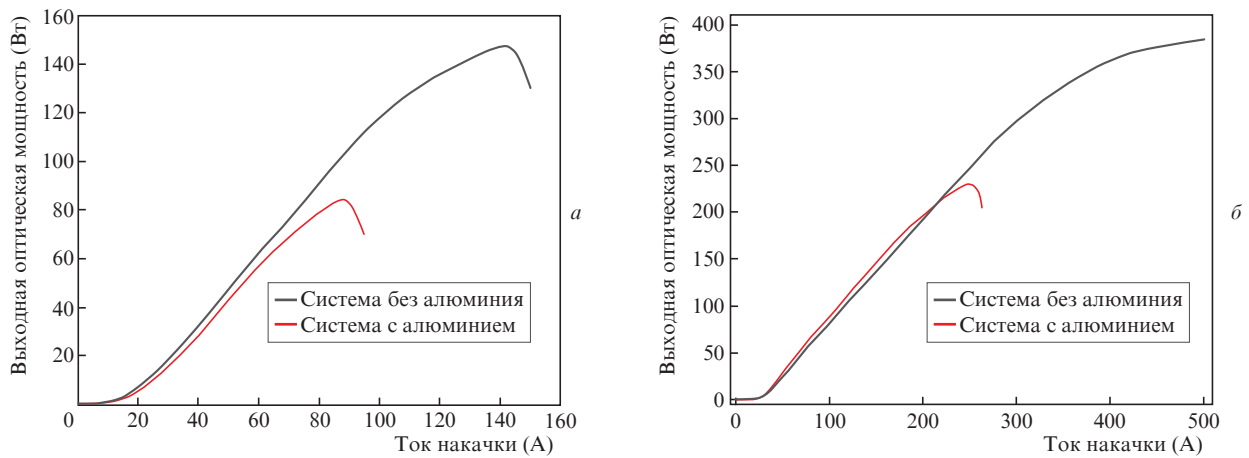


Рис.3. Ватт-амперные характеристики в квазинепрерывном режиме накачки (25 Гц, 250 мкс) ЛЛД длиной 5 мм без термостабилизации (а) и ЛЛД длиной 10 мм со стабилизацией температуры теплоотвода при 25 °С (б).

деградация происходит при 150 Вт. Для линеек длиной 10 мм, ВТАХ которых измерялись при постоянной температуре теплоотвода 25 °С, наблюдалась подобная ситуация. Выходная мощность для ЛЛД на основе системы с алюминием ограничена катастрофической деградацией при 230 Вт. Выходная же мощность ЛЛД на основе системы без алюминия продолжала расти и насыщалась при 380 Вт с деградацией отдельных активных элементов. В обоих случаях максимальная выходная мощность для ЛЛД на основе безалюминиевой ГС была больше в 1.7–2 раза. Из вольт-амперных характеристик для линеек длиной 5 мм (рис.4) следует, что омические сопротивления обоих приборов близки. Однако напряжение отсечки у ЛЛД на основе системы без алюминия меньше, оно составило 1.46 В, тогда как для ЛЛД на основе системы с алюминием – 1.61 В.

Пороговые токи для системы с алюминием и без алюминия составляли 16–18 А для ЛЛД длиной 5 мм и 30–33 А для ЛЛД длиной 10 мм, а дифференциальная эффективность во всех случаях составила около 1.1 Вт/А.

Для описания температурной чувствительности порогового тока  $I_{th}(T)$  использовалась общепринятая полуэмпирическая зависимость [25]:

$$I_{th}(T) = I_{th}(T_{ref}) \exp\left(\frac{T - T_{ref}}{T_0}\right),$$

где  $I_{th}(T)$  – пороговый ток при температуре  $T_{ref}$ ;  $T_0$  – характеристическая температура. Характеристическая температура  $T_0$  для линеек на основе системы с алюминием и системы без алюминия составила 110 и 140 К соответственно. Угловая расходимость излучения на полувывоте для исследуемых линеек по быстрой оси находилась в диапазоне 40–45°, а по медленной оси 10–12°.

При анализе данных ресурсных испытаний ЛЛД длиной 5 мм в квазинепрерывном режиме накачки было установлено, что при токах эксплуатации около 50–55 А наработка превышала  $10^6$  импульсов для ЛЛД на основе обеих систем материалов. Однако при повышении тока в 1.5 раза ресурс ЛЛД на основе ГС с алюминием заметно уменьшался, что было обусловлено приближением мощностных параметров к предельным. В свою очередь, ресурс ЛЛД на основе безалюминиевой ГС оставался таким же длительным.

Возможной причиной различия максимальных выходных оптических мощностей исследуемых ЛЛД и более ранней катастрофической оптической деградации ЛЛД на основе системы с алюминием является разная степень перегрева зеркал резонатора. Известно, что до порогового тока основным источником тепловой мощности на гранях резонатора является поверхностная рекомбинация, которая при достижении порогового тока насыщается и затем почти не изменяется. В то же время, по мере увеличения тока накачки, начинает увеличиваться интенсивность двух других источников: джоулева нагрева и поглощения. При повышенных токах накачки основным источником тепловой мощности на гранях резонатора является поглощение лазерного излучения [26].

Причина оптического поглощения на зеркалах заключается в том, что на границе полупроводник-изолятор имеются глубокие центры (состояния на гетерограницах), которые свойственны используемому материалу, и их плотность может увеличиваться из-за окисления полупроводникового материала. Поглощение лазерного излучения приводит к образованию электронно-дырочных пар, которые безызлучательно рекомбинируют в области грани (до 5 мкм). В результате безызлучательная поверхностная рекомбинация нагревает материал грани, и его

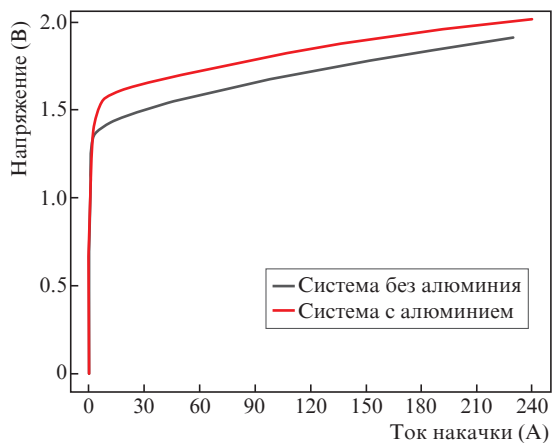


Рис.4. Вольт-амперные характеристики в квазинепрерывном режиме накачки (25 Гц, 250 мкс) ЛЛД длиной 5 мм без термостабилизации.

ширина запрещенной зоны уменьшается. Это уменьшение запрещенной зоны, в свою очередь, увеличивает поглощение света на гранях [27, 28], и замыкается петля обратной связи. При достижении определенной критической температуры перегрева, около 100–400 °С в зависимости от конструкции ГС и активного элемента [27, 28], процесса нагрева зеркала становится необратимым. Грань резонатора быстро разогревается (за время порядка 10 нс) до температуры плавления материала, и возникает катастрофическая оптическая деградация зеркала полупроводникового лазера [29]. Поверхностная рекомбинация играет более существенную негативную роль в системе материалов на основе AlGaAs/GaAs, чем в системе на основе GaAsP/GaInP.

Для оценки перегрева передней грани резонатора 5 мм ЛЛД вследствие поверхностной рекомбинации и поглощения оптического излучения были проведены численные расчеты. В модель [30], основанную на нестационарном уравнении теплопроводности с внутренними источниками тепловыделения, добавлены граничные условия, которые учитывают нагрев передней и задней грани резонатора ЛЛД вследствие безызлучательной поверхностной рекомбинации:

$$-k_z \frac{\partial T}{\partial z(0, t)} = + E_q v_{\text{sur}} n(0, t),$$

$$-k_z \frac{\partial T}{\partial z(L, t)} = - E_q v_{\text{sur}} n(L, t),$$

где  $k_z$  – теплопроводность вдоль оси  $z$ , которая перпендикулярна грани резонатора;  $T$  – температура грани;  $E_q$  – ширина запрещенной зоны вблизи грани резонатора лазерного излучателя;  $v_{\text{sur}}$  – скорость поверхностной безызлучательной рекомбинации;  $n$  – концентрация носителей заряда вблизи грани резонатора;  $t$  – время.

Тепловая мощность, выделяемая вследствие поглощения лазерного излучения на гранях резонатора, вычисляется согласно формуле, предложенной в [28].

На рис.5 представлены расчетные кривые перегрева выходного зеркала ЛЛД длиной 5 мм на основе систем с алюминием и без него относительно температуры активной области для токов накачки 17 и 90 А. Для тока 90 А и диапазона скоростей поверхностной рекомбинации

$10^4$ – $10^5$  см/с расчетная оценка составляет 35–70 К, а для диапазона  $10^5$ – $10^6$  см/с – 70–300 К. Стоит отметить, что для интервала скоростей поверхностной рекомбинации  $2 \times 10^5$ – $10^6$  см/с расчетная величина перегрева грани захватывается интервалом критической температуры (100–400 °С), при котором высока вероятность наступления катастрофической оптической деградации зеркала для ЛЛД на основе структур с алюминием. Поэтому уменьшение скорости поверхностной рекомбинации позволяет увеличить порог катастрофической оптической деградации зеркал и максимальную плотность оптической мощности [31].

Несмотря на то что для ЛЛД на основе обеих систем материалов были применены одинаковые технологические операции при формировании выходных зеркальных граней полупроводникового кристалла, более раннее насыщение выходной оптической мощности и катастрофическая оптическая деградация ЛЛД на основе системы с алюминием по сравнению с ЛЛД на основе системы без алюминия, по мнению авторов, скорее всего, связаны с существенным нагревом граней резонатора. Для установления точной причины различия максимальных оптических мощностей исследуемых ЛЛД требуются дополнительные экспериментальные и теоретические исследования.

Как уже было упомянуто выше, при высоких токах накачки поглощение является основным источником нагрева граней резонатора полупроводникового излучателя, причем чем больше скорость поверхностной рекомбинации на гранях резонатора, тем оно более интенсивно [26]. Поэтому для увеличения порога катастрофической оптической деградации зеркал и, как следствие, увеличения оптической мощности, особенно для ЛЛД на основе системы с алюминием, кроме применения пассивации граней, целесообразно использовать непоглощающие зеркала, которые уменьшают поглощение гранями лазерного излучения [27]. Что касается ЛЛД на основе системы без алюминия, то для улучшения их мощностных и ресурсных характеристик требуется уменьшать уже не только температуру зеркала, но и влияние термических и нетермических механизмов насыщения оптической мощности, таких, например, как рост концентрации носителей в волноводных слоях и пространственное выжигание носителей заряда [32, 33].

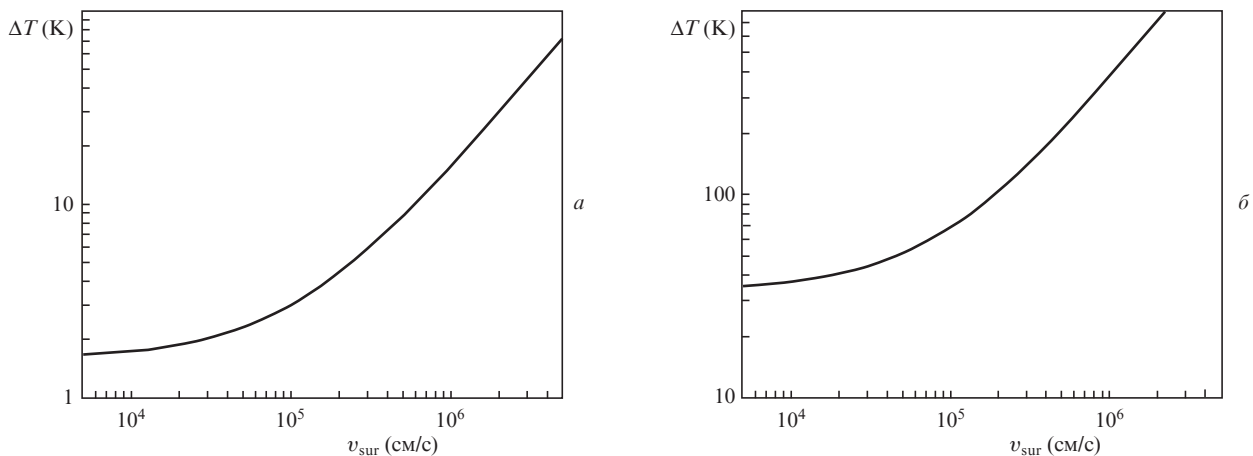


Рис.5. Расчетная кривая перегрева выходного зеркала ЛЛД длиной 5 мм для разных скоростей поверхностной рекомбинации: около порогового тока  $I = 17$  А (а), при токе накачки  $I = 90$  А (б).

## 4. Заключение

В настоящей работе были исследованы квазинепрерывные линейки лазерных диодов спектрального диапазона 800–810 нм на основе гетероструктур (Al)GaAs/AlGaAs/GaAs и GaAsP/GaInP/GaAs, выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии. Показано, что максимальная выходная мощность линеек на основе GaAsP/GaInP/GaAs превышала примерно в 1.5–2 раза мощность линеек на основе (Al)GaAs/AlGaAs/GaAs и составляла 150 Вт для линеек длиной 5 мм и 380 Вт для линеек длиной 10 мм. Линейки на основе GaAsP/GaInP/GaAs показали меньшую чувствительность выходных характеристик при увеличении температуры теплоотвода. Было показано, что более ранняя катастрофическая оптическая деградация линеек на основе ГС (Al)GaAs/AlGaAs/GaAs по сравнению с линейками на основе ГС GaAsP/GaInP/GaAs, скорее всего, связана с существенным нагревом граней резонатора, даже несмотря на меньшее тепловое сопротивление системы материалов с алюминием.

Данная работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ для молодых ученых-докторов наук МД-3928.2022.1.2.

1. Bachmann F., Loosen P., Poprawe R. *High Power Diode Lasers: Technology and Applications* (New York: Springer Series in Optical Sciences, 2007).
2. Behringer M., Eberhard F., Herrmann G., Luft J., Maric J., Morgott S., Philippens M.C., Teich W. *Proc. SPIE*, **4831**, 4 (2003).
3. Ладугин М.А., Коваль Ю.П., Мармалюк А.А., Петровский В.А., Багаев Т.А., Андреев А.Ю., Падалица А.А., Симаков В.А. *Квантовая электроника*, **43** (5), 407 (2013) [*Quantum Electron.*, **43** (5), 407 (2013)].
4. Knauer A., Erbert G., Staske R., Sumpf B., Wenzel H., Weyers M. *Semiconductor Science and Technology*, **20**, 621 (2005).
5. Garbuzov D.Z., Abeles J.H., Morris N.A., Gardner P.D., Triano A.R., Harvey M.G., Gilbert D.B., Connolly J.C. *Proc. SPIE*, **2682**, 20 (1996).
6. Мармалюк А.А., Ладугин М.А., Андреев А.Ю., Телегин К.Ю., Яроцкая И.В., Мешков А.С., Коняев В.П., Сапожников С.М., Лебедева Е.И., Симаков В.А. *Квантовая электроника*, **43** (10), 895 (2013) [*Quantum Electron.*, **43** (10), 895 (2013)].
7. Мармалюк А.А., Андреев А.Ю., Коняев В.П., Ладугин М.А., Лебедева Е.И., Мешков А.С., Морозюк А.Н., Сапожников С.М., Данилов А.И., Симаков В.А., Телегин К.Ю., Яроцкая И.В. *ФТП*, **48** (1), 120 (2014).
8. Тер-Мартirosян А.Л., Свердлов М.А., Родин С.Н., Пихтин Н.А. *Фотоника*, **13** (5), 486 (2019).
9. Hülsewede R., Schulze H., Sebastian J., Schröder D., Meusel J., Hennig P. *Proc. SPIE*, **6456**, 645607 (2007).
10. Morales J., Lehkonen S., Liu G., Schleuning D., Acklin B. *Proc. SPIE*, **9733**, 97330T (2016).
11. Fan Yang, Gangming Liu, Cunxue Wu, Zhiwan Yan. *Proc. SPIE*, **11562**, 115621C (2020).
12. Stringfellow G.B. *Organometallic Vapor-Phase Epitaxy: Theory and Practice* (San Diego: Academic Press, 1999).
13. Adachi S. *Properties of Semiconductor Alloys: Group-IV, III-V and II-VI Semiconductors* (Chichester: John Wiley & Sons, 2009).
14. Chand N., Chu S.N.G., Dutta N.K., Lopata J., et al. *IEEE J. Quantum Electron.*, **30**, 424 (1994).
15. Алферов Ж.И., Кацавец Н.И., Петриков В.Д., Тарасов И.С., Халфин В.Б. *ФТП*, **30**, 474 (1996).
16. Ueda O., Pearton S.J. (Eds) *Materials and Reliability Handbook for Semiconductor Optical and Electron Devices* (New York: Springer Science + Business Media, 2013).
17. Ling Bao, Jun Wang, Mark Devito, Dapeng Xu, Mike Grimshaw, Weimin Dong, Xingguo Guan, Hua Huang, Paul Leisher, Shiguo Zhang, Damian Wise, Rob Martinsen, Jim Haden. *Proc. SPIE*, **7953**, 79531B (2011).
18. Eliseev P.G. *Progress in Quantum Electron.*, **20** (1), 1 (1996).
19. Moison J.M., Guille C., Houzay F., Barthe F., Van Rompay M. *Phys. Rev.*, **B40** (9), 6149 (1989).
20. Prost W., Scheffer F., Liu Q., Lindner A., Lakner H., Gyuro I., Tegude F.J. *J. Cryst. Growth*, **146**, 538 (1995).
21. Philips B.A., Norman A.G., Seong T.Y., Mahajan S., Booker G.R., Skowronski M., Harbison J.P., Keramidas V.G. *J. Cryst. Growth*, **140**, 249 (1994).
22. Дегтярева Н.С., Кондаков С.А., Микаелян Г.Т., Горлачук П.В., Ладугин М.А., Мармалюк А.А., Рябоштан Ю.Л., Яроцкая И.В. *Квантовая электроника*, **43** (6), 509 (2013) [*Quantum Electron.*, **43** (6), 509 (2013)].
23. Viswanath A.K. *Handbook of Surfaces and Interfaces of Materials, Volume 1: Surface and Interface Phenomena*. Ed. by H.S. Nalwa (San Diego: Academic Press, 2001).
24. Pearton S.J., Ren F., Hobson W.S., Abernathye C.R., Chakrabarti U.K. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **12** (1), 142 (1994).
25. Кейси Х., Паниш М. *Лазеры на гетероструктурах* (М., Мир, 1981, т. 1).
26. Ziegler M., Talalaev V., Tomm J.W., Elsaesser Th., Ressel P., Sumpf B., Erbert G. *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 203506 (2008).
27. Tomm J.W., Ziegler M., Hempel M., Elsaesser T., Tomm J.W. *Laser Photonics Rev.*, **5** (3), 422 (2011).
28. Алферов Ж.И., Кацавец Н.И., Петриков В.Д., Тарасов И.С., Халфин В.Б. *ФТП*, **30** (3), 475 (1995).
29. Nakwaski W. *J. Appl. Phys.*, **67**, 1659 (1990).
30. Ладугин М.А., Гультиков Н.В., Мармалюк А.А., Коняев В.П., Соловьева А.В., *Квантовая электроника*, **49** (10), 905 (2019) [*Quantum Electron.*, **49** (10), 905 (2019)].
31. Yoo J.S., Lee H.H., Zory P.S. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **3** (7), 594 (1991).
32. Демидов Д.М., Тер-Мартirosян А.Л., Булашевич К.А., Хохлев О.В., Карпов С.Ю. *Научное приборостроение*, **23** (2), 129 (2013).
33. Wenzel H., Crump P., Pietrzak A., Wang X., Erbert G., Tränkle G. *New J. Phys.*, **12**, 085007 (2010).