Сравнительный анализ излучательных характеристик Al-содержащих и безалюминиевых квантово-размерных гетероструктур спектрального диапазона 780–850 нм

© Н.В. Гультиков[1], К.Ю. Телегин[1], А.Ю. Андреев[1], И.В. Яроцкая[1], Т.А. Багаев[1], А.М. Субботин[1], В.С. Киркин[1], А.А. Мармалюк[2], М.А. Ладугин[3], В.Е. Захаров[4], А.Н. Яблонский[4], В.В. Румянцев[4], С.В. Морозов[4]

[1] Научно-исследовательский институт „Полюс“ им. М.Ф. Стельмаха,
117342 Москва, Россия
[2] Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы,
117198 Москва, Россия
[3] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
141701 Московская область, Долгопрудный, Россия
[4] Институт физики микроструктур Российской академии наук,
603950 Нижний Новгород, Россия

E-mail: nikita.gultickov@yandex.ru

Поступила в Редакцию 21 мая 2026 г.
В окончательной редакции 26 августа 2026 г.
Принята к публикации 16 сентября 2026 г.

Проведено сравнение излучательных характеристик квантово-размерных гетероструктур диапазона 780–850 нм на основе Al-содержащей и безалюминиевой систем материалов. Результаты показывают значительное преимущество безалюминиевых гетероструктур по интенсивности фотолюминесценции (в 10–30 раз), несмотря на более широкий спектр фотолюминесценции. Также у безалюминиевых гетероструктур наблюдается существенно (больше чем в 2–5 раз) более длительное время жизни носителей заряда. Проанализированы возможные причины данных различий, а также их влияние на выходные характеристики полупроводниковых излучателей.

Ключевые слова: квантовые ямы, Al-содержащая и безалюминиевая системы материалов, фотолюминесценция.

DOI: 10.61011/FTP.2026.08.63954.9886

1. Введение

В настоящее время для полупроводниковых излучателей спектрального диапазона 780–850 нм применяются квантово-размерные гетероструктуры (ГС) на основе Al-содержащей (AlGaAs/GaAs) [1,2] и безалюминиевой (InGaAsP/GaAs) [3,4] систем материалов. Обе системы материалов имеют свои достоинства и недостатки, которые обусловлены как особенностями технологического процесса создания ГС, так и свойствами самих материалов. Эти различия могут оказывать влияние на структурное совершенство ГС, качество их гетерограниц, а также на рабочие характеристики излучателей на их основе.

Классические Al-содержащие ГС обладают малым рассогласованием параметров кристаллических решеток, что позволяет получать ГС с низкой плотностью дефектов на гетерограницах и качественные эпитаксиальные слои AlGaAs различной толщины с вариацией мольной доли AlAs в широких пределах. Вместе с тем технология получения Al-содержащих ГС осложняется высоким сродством алюминия к кислороду, благодаря чему в процессе роста и во время дальнейшего формирования излучающего элемента может произойти загрязнение материала кислородом. Атомы кислорода, встроенные в кристаллическую решетку AlGaAs, образуют в запрещенной зоне уровни-ловушки, которые являются центрами безызлучательной рекомбинации. Так, присутствие кислорода в активной области негативно влияет на приборные характеристики: повышает пороговую плотность тока, уменьшает дифференциальную эффективность и ресурс работы полупроводниковых лазеров [5,6]. В Al-содержащих ГС спектрального диапазона 700–800 нм проблема кислородного загрязнения особенно критична, поскольку для обеспечения генерации на таких длинах волн в активную область ГС необходимо вводить больше алюминия. Переход к безалюминиевым ГС позволяет принципиально уменьшить кислородное загрязнение, поскольку соединения InGaP и InGaAsP обладают значительно меньшим сродством к кислороду по сравнению с AlGaAs.

Другое важное отличие рассматриваемых ГС состоит в различных значениях скоростей поверхностной рекомбинации. Так, для безалюминиевой ГС (GaAs/GaInP) скорость поверхностной рекомбинации составляет 10^4-10^5 см/с, тогда как для Al-содержащей ГС (GaAs/AlGaAs) — 10^5-10^6 см/с. На гетерограницах

квантовая яма/барьер наблюдается аналогичная картина: $\sim 10^1-10^2$ см/с против $\sim 10^2-10^3$ см/с соответственно [7]. Эти различия напрямую влияют на оптическую прочность выходных зеркал [8] и величину внутреннего квантового выхода лазеров. Дополнительным преимуществом безалюминиевых гетероструктур является более высокая устойчивость к деградации, что обеспечивает сохранение мощностных характеристик в процессе эксплуатации [9].

Для Al-содержащих ГС характерен немного больший температурный коэффициент $d\lambda/dT$, который показывает, как изменяется длина волны генерации лазерного излучения от температуры активной области. Для современных лазеров, излучающих на длине волны 808 нм, на основе (Al)GaAs/AlGaAs-гетероструктур характерны значения 0.27–0.29 нм/K, а для GaAsP/GaInP — 0.25–0.27 нм/K [10].

Недостатком безалюминиевых ГС является их более низкая теплопроводность, что увеличивает тепловое сопротивление ГС в $\sim 1.5-2$ раза по сравнению с Al-содержащими ГС [7]. Кроме этого, изготовление таких ГС осложнено технологическими проблемами: сегрегацией индия, взаимодействием компонентов V группы на границах, зонами несмешиваемости в InGaAsP и эффектом упорядочения в (Al)GaInP [11].

Важнейшим аспектом создания безалюминиевых ГС является контроль упругих напряжений в активной области и согласование периода кристаллической решетки эпитаксиальных слоев с подложкой GaAs. Правильное использование напряжений в квантовой яме позволяет улучшить выходные характеристики лазеров по сравнению с излучателями на основе ненапряженных ГС, однако их неправильный учет ведет к появлению дислокаций несоответствия и последующей деградации мощностных параметров приборов [11].

Вместе с тем описанные отличия в значительной степени подвержены влиянию конструкции ГС и технологии их формирования, что приводит к достаточно широкому разбросу параметров. Ранее в работе [11] нами были исследованы квантово-размерные ГС GaAs/GaInP и GaAs/AlGaAs с максимумом спектра излучения в области 860 нм. В указанной работе обе ГС имели один и тот же материал квантовой ямы (КЯ) (GaAs), а сравнение ограничивалось спектрами ФЛ.

Цель же настоящей работы — получение Al-содержащих и безалюминиевых квантово-размерных ГС в спектральном диапазоне 780–850 нм и сравнение их излучательных характеристик (спектров и кинетик фотолюминесценции КЯ). Исследуемые ГС отличаются материалом КЯ ((Al)GaAs и (In)GaAsP).

2. Исследуемые образцы и методика их измерения

Для спектрального диапазона 780–800 нм все исследуемые образцы конструктивно представляли собой узкозонную квантовую яму ((Al)GaAs — для Al-содержащих ГС и GaAsP — для безалюминиевых), помещенную между широкозонными барьерами ($Al_{0.32}Ga_{0.68}As$ или $Ga_{0.51}In_{0.48}P$ соответственно). Толщина КЯ во всех случаях составляла 100 Å, а толщина барьерных слоев — 0.9 и 0.1 мкм. Причем барьерный слой толщиной 0.9 мкм располагался ближе к подложке GaAs. Состав КЯ подбирался таким образом, чтобы обеспечить заданное положение максимума спектра ФЛ. Все слои ГС оставались нелегированными, фоновый уровень легирования составлял $\sim 5 \cdot 10^{15}$ см$^{-3}$. Для диапазона 830–850 нм конструкция ГС сохранялась, за исключением материала квантовой ямы для безалюминиевых ГС, где использовалось четверное соединение InGaAsP.

В процессе формирования образцов проводилась оптимизация технологических параметров с целью достижения максимальной интенсивности фотолюминесценции.

Для анализа излучательных параметров квантовых ям были проведены измерения спектров фотолюминесценции (ФЛ). Оптическая накачка осуществлялась лазером с длиной волны излучения 532 нм, а мощность лазера составляла ~ 3.8 мВт при диаметре пятна на образцах ≈ 100 мкм.

При исследовании временны́х зависимостей ФЛ ГС возбуждение ФЛ осуществлялось с помощью импульсного лазерного излучения на длине волны 532 нм с длительностью импульсов ~ 10 пс и частотой повторения импульсов 80 МГц. Средняя мощность излучения накачки варьировалась в диапазоне от 300 мкВт до 5 мВт. Для регистрации сигнала ФЛ использовался решеточный монохроматор Acton 2300i, система регистрации одиночных фотонов на основе сверхпроводящего однофотонного детектора (Сконтел) и система коррелированного по времени счета одиночных фотонов TimeHarp 260. Временно́е разрешение системы регистрации ФЛ составляло ~ 50 пс. Все измерения проводились при комнатной температуре.

3. Результаты и обсуждение

3.1. ГС спектрального диапазона 780–800 нм

Сравнение спектров ФЛ образцов обоих систем материалов представлено на рис. 1. Центральные длины волн ФЛ для обоих типов ГС составили 785 нм. Как было отмечено ранее, получение квантовых ям GaAsP/GaInP осложнено рядом физико-химических процессов (например, сегрегацией индия и протеканием обменных реакций между As и P), которые происходят на поверхности роста в процессе осаждения и искажают номинальный профиль квантовой ямы [11]. Это выражается в более широком спектре ФЛ ($\Delta\lambda = 30$ нм) по сравнению с квантовой ямой AlGaAs/AlGaAs, для которой характерны более резкие гетерограницы ($\Delta\lambda = 17$ нм). Тем не менее экспериментальные данные показывают, что

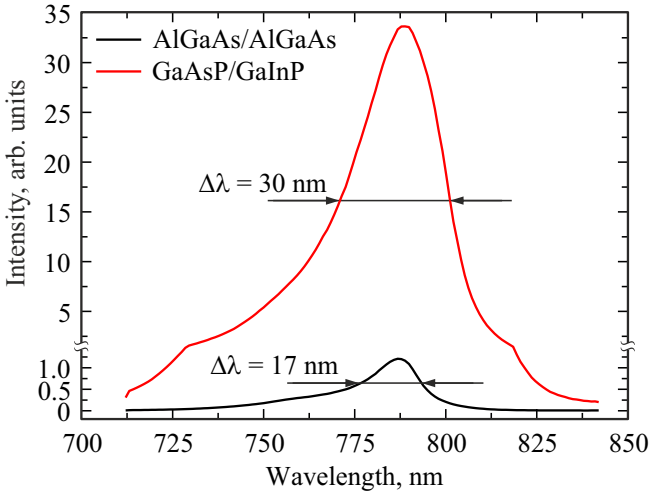


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции Al-содержащей и безалюминиевой ГС.

более высокую интенсивность ФЛ имеют безалюминиевые ГС. Причем максимумы интенсивностей отличаются в ~ 30 раз. Причинами данных отличий могут служить разная скорость безызлучательной рекомбинации на поверхности и гетерограницах квантовой ямы и барьера, а также более высокая концентрация центров безызлучательной рекомбинации (например, кислорода) в Al-содержащих ГС.

Дополнительно были исследованы ГС с квантовыми ямами AlGaAs различного состава (рис. 2, *a*). Для всех Al-содержащих и безалюминиевых ГС состав, толщины барьерных слоев и толщина КЯ не изменялись. Изменялся только состав КЯ. При увеличении мольной доли AlAs в квантовой яме AlGaAs (т. е. при уменьшении центральной длины волны ФЛ от 800 до 780 нм) существенно уменьшается интенсивность фотолюминесценции, что может быть связано с увеличением концентрации кислорода на гетерограницах квантовая яма/барьер и в глубине квантовой ямы, а также безызлучательной рекомбинации на гетерограницах квантовой ямы и барьера. Для гетероструктур GaAsP/GaInP сигнал был стабильным на всем исследуемом спектральном диапазоне (рис. 2, *b*).

Для образцов с центральной длиной фотолюминесценции 800 нм была измерена кинетика ФЛ (рис. 3). Время жизни носителей заряда в квантовой яме для безалюминиевых ГС превосходит более чем в 5 раз аналогичный параметр для Al-содержащих ГС. Для безалюминиевых ГС оно составило 2.7 нс, для Al-содержащих — 0.4 нс.

Таким образом, показано, что для спектрального диапазона 780–800 нм ГС на основе GaAsP/GaInP демонстрируют значительно более высокие значения интенсивности фотолюминесценции. Однако данные ГС при этом имеют более широкий спектр фотолюминесценции по сравнению с ГС AlGaAs/AlGaAs.

3.2. ГС спектрального диапазона 830–850 нм

Спектры фотолюминесценции исследуемых ГС представлены на рис. 4. Центральная длина волны фотолюминесценции для обоих типов ГС составила 830 нм. Как и для прошлого спектрального диапазона, более высокую интенсивность фотолюминесценции показали безалюминиевые ГС. Максимумы интенсивностей отличаются примерно на порядок. Полуширина спектра ФЛ квантовой ямы InGaAsP превышает аналогичный параметр для квантовой ямы GaAs, что говорит о более резких гетерограницах и равномерности ширины квантовой ямы GaAs по сравнению с квантовой ямой InGaAsP.

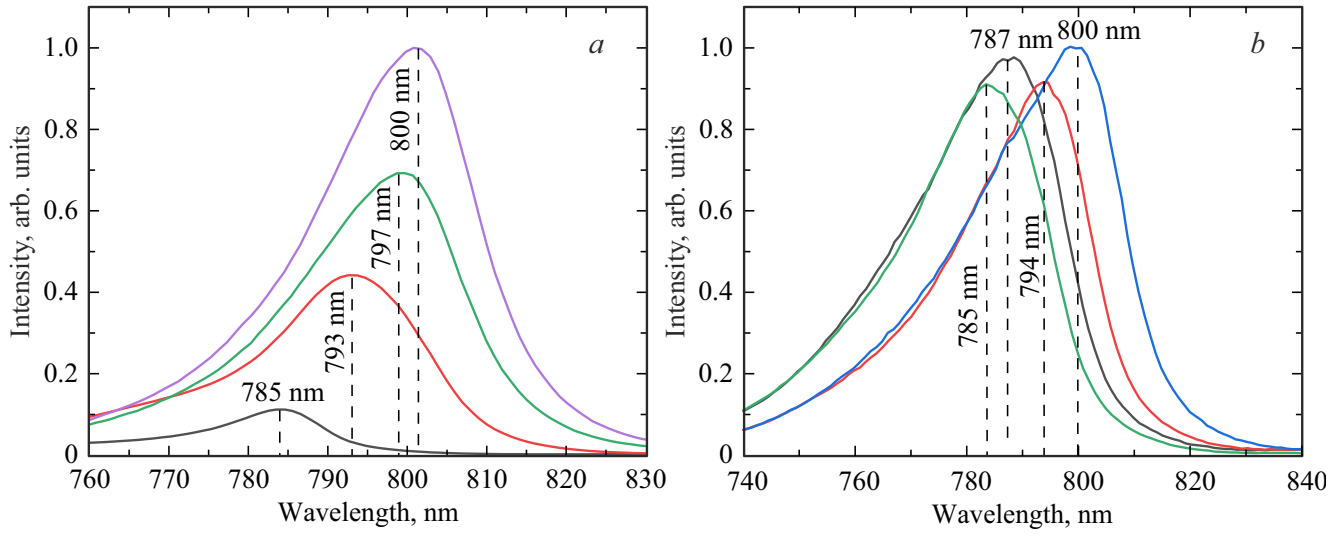


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции Al-содержащих (*a*) и безалюминиевых (*b*) ГС гетероструктур с центральной длиной волны фотолюминесценции 780–800 нм.

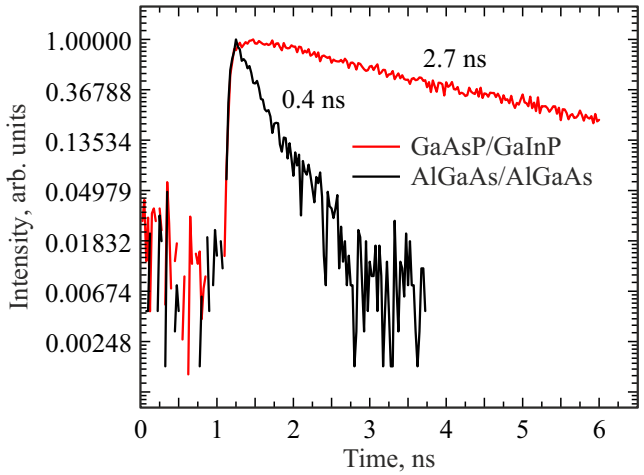


Рис. 3. Время-разрешенная фотолюминесценция квантово-размерных Al-содержащей и не содержащей Al ГС спектрального диапазона 780–800 нм.

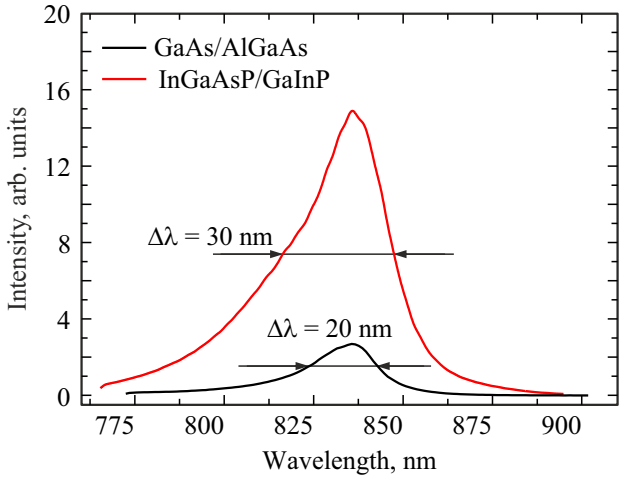


Рис. 4. Спектры фотолюминесценции Al-содержащей и безалюминиевой ГС.

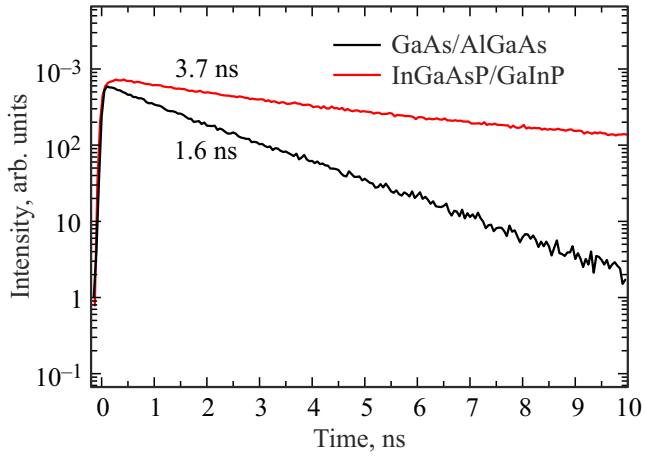


Рис. 5. Время-разрешенная фотолюминесценция квантово-размерных Al-содержащей и не содержащей Al ГС спектрального диапазона 830–850 нм.

Кроме этого, для вышеописанных образцов была измерена кинетика ФЛ (рис. 5). Время жизни носителей заряда в квантовой яме InGaAsP для безалюминиевых ГС превосходит более чем в 2 раза аналогичный параметр для квантовой ямы GaAs для Al-содержащих ГС. Для безалюминиевых ГС время жизни носителей составило 3.7 нс, для Al-содержащих — 1.6 нс.

Возможной причиной отличий интенсивностей фотолюминесценции, как и для спектрального диапазона 780–800 нм, может служить различие в скорости рекомбинации на свободной поверхности и гетерограницах квантовой ямы и барьерных слоев, а также различие в концентрации безызлучательных центров рекомбинации в квантовой яме.

Как уже было отмечено ранее, важным отличием безалюминиевых ГС от Al-содержащих является наличие упругих напряжений в квантовых ямах GaAsP и InGaAsP, тогда как квантовая яма (Al)GaAs согласована по параметру решетки с окружающими слоями. При толщине квантовой ямы ниже критической упругие напряжения удерживаются в структуре без образования кристаллических дефектов: напряжения сжатия снижают пороговую плотность тока за счет уменьшения эффективной плотности состояний валентной зоны, тогда как напряжения растяжения повышают материальное усиление и внешнюю дифференциальную эффективность в полупроводниковых лазерах [12]. При превышении критической толщины происходит пластическая релаксация с образованием дислокаций несоответствия на гетерограницах квантовой ямы. Дислокации несоответствия служат дополнительными центрами безызлучательной рекомбинации, ускоряя деградацию прибора. Максимально достижимая выходная оптическая мощность излучателей и интенсивность ФЛ наиболее чувствительны к возникновению подобных дефектов и значительно снижаются при их наличии.

Обобщая вышесказанное, можно заключить, что для спектрального диапазона 830–850 нм более высокую излучательную эффективность показали ГС InGaAsP/GaInP.

4. Заключение

Объединяя результаты исследования квантовых ям, Al-содержащих и безалюминиевых ГС спектрального диапазона 780–850 нм, можно прийти к выводу, что наиболее выгодной с точки зрения получения высоких излучательных характеристик является система материалов, не содержащая Al. Квантовые ямы GaAsP и InGaAsP имеют заметно более высокую интенсивность фотолюминесценции по сравнению с квантовой ямой (Al)GaAs, несмотря на более широкий спектр фотолюминесценции. Данные различия, скорее всего, связаны с меньшей скоростью безызлучательной рекомбинации на поверхности и гетерограницах квантовой ямы и барьера в образцах на основе (In)GaAsP, а также отсутствием

атомов Al, который имеет высокое сродство к кислороду. Однако практическое применение безалюминиевых ГС осложняется необходимостью решения ряда технологических проблем, что сдерживает их широкое распространение.

Благодарности

Исследования кинетики ФЛ выполнены в рамках государственного задания ИФМ РАН (проект № FFUF-2024-0019).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] S. Saeed, M. Usman, S. Ali, H. Ali, L. Mustafa. Optical Mater., **139**, 113809 (2023). DOI: 10.1016/j.optmat.2023.113809
[2] E.A. Avrutin, B.S. Ryvkin, J.T. Kostamovaara. IET Optoelectronics, **15**, 194 (2021). DOI: 10.1049/ote2.12033
[3] M. Krakowski, M. Lecomte, N. Michel, M. Calligaro, M. Carbonnelle, M. Tran, M. Lamponi, C. Cayron, V. Ligeret, J.B. Lobé, R. Mostallino, et al. Proc. SPIE, **9370**, 93702C (2015). DOI: 10.1117/12.2084696
[4] Z. Xu, H. Dong, J.Z. Gang, Z.A. Qin, L. Jian, W.Z. Yong, X.B. She. Optics Lett., **47**, 1153 (2022). DOI: 10.1364/OL.451551
[5] A. Knauer, H. Wenzel, G. Erbert, B. Sumpf, M. Weyers. J. Electron. Mater., **30**, 1421 (2001). DOI: 10.1007/s11664-001-0195-8
[6] N. Chand, S.N.G. Chu, N.K. Dutta, J. Lopata, M. Geva, A.V. Syrbu, A.Z. Mereutza, V.P. Yakovlev. IEEE J. Quant. Electron., **30**, 424 (1994). DOI: 10.1109/3.283790
[7] M. Levinshtein, S. Rumyantsev, M. Shur (eds). *Handbook Series on Semiconductor Parameters*. Vol. 2: *Ternary and Quaternary III–V Compounds* (World Scientific, Singapore-N.J., 1999).
[8] Н.В. Гультиков, К.Ю. Телегин, А.Ю. Андреев, Л.И. Шестак, В.А. Панарин, М.Ю. Старынин, А.А. Мармалюк, М.А. Ладугин. Квант. электрон., **53**, 667 (2023).
[9] P.G. Eliseev. Progr. Quant. Electron., **20**, 1 (1996). DOI: 10.1016/0079-6727(95)00002-X
[10] L. Fan, C. Cao, G. Thaler, D. Nonnemacher, F. Lapinski, I. Ai, B. Caliva, S. Das, R. Walker, L. Zeng, M. McElhinney, P. Thiagarajan. Proc. SPIE, **7918**, 791805 (2011).
[11] М.А. Ладугин, А.Ю. Андреев, И.В. Яроцкая, Ю.Л. Рябоштан, Т.А. Багаев, А.А. Падалица, А.А. Мармалюк, М.Г. Васильев. Неорг. матер., **55**, 345 (2019). DOI: 10.1134/S0002337X19040092
[12] M. Levy, Y. Berk, Y. Karni. Proc. SPIE, **6104**, 61040B (2006). DOI: 10.1117/12.645815

Редактор Г.А. Оганесян

Comparative analysis of the emission characteristics of Al-containing and Al-free quantum well heterostructures in the spectral range of 780–850 nm

N.V. Gultikov[1], K.Y. Telegin[1], A.Y. Andreev[1], I.V. Yarotskaya[1], T.A. Bagaev[1], A.M. Subbotin[1], V.S. Kirkin[1], A.A. Marmalyuk[2], M.A. Ladugin[3], V.E. Zakharov[4], A.N. Yablonsky[4], V.V. Rumyantsev[4], S.V. Morozov[4]

[1] Stelmakh Polyus Scientific Research Institute, 117342 Moscow, Russia
[2] Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia, 117198 Moscow, Russia
[3] Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), 141701 Moscow Region, Dolgoprudny, Russia
[4] Institute for Physics of Microstructures Russian Academy of Sciences, 603950 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract The radiative characteristics of quantum well heterostructures in the range of 780–850 nm based on Al-containing and Al-free material systems are compared. The results show a significant advantage of Al-free heterostructures in terms of photoluminescence intensity (10–30 times), despite the wider photoluminescence spectrum. Al-free heterostructures also have significantly (more than 2–5 times) longer charge carrier lifetimes. The possible causes of these differences are analyzed, as well as their effect on the output characteristics of semiconductor lasers.