

Широкополосная спонтанная и стимулированная люминесценция сильнолегированных $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ структур

П.А. Бохан¹, К.С. Журавлев¹, Дм.Э. Закревский^{1,2},
Т.В. Малин¹, И.В. Осинных¹, Н.В. Фатеев^{1,3*}

¹Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН
630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 13

²Новосибирский государственный технический университет
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

³Новосибирский национальный исследовательский государственный университет
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Поступила в редакцию 26.12.2017 г.

Исследованы спектральные характеристики спонтанной и стимулированной люминесценции $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ структур, сильнолегированных кремнием с концентрацией $n_{\text{Si}} > 10^{20} \text{ см}^{-3}$, при оптической импульсной накачке излучением с $\lambda = 266 \text{ нм}$. Полученное доминирующее широкополосное излучение с шириной $\sim 300 \text{ нм}$ охватывает весь видимый диапазон. Спектр излучения от торца структуры расщеплен на узкие компоненты, определяемые модовой структурой образованного плоского волновода. Результаты указывают на стимулированный характер излучения. Измеренные значения коэффициентов усиления для различных структур находятся в диапазоне $20\text{--}70 \text{ см}^{-1}$. Полученные результаты указывают на возможность создания нового класса лазеров, перестраиваемых в широком диапазоне длин волн.

Ключевые слова: $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ структуры, люминесценция, усиление; $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ structures, luminescence, amplification.

Введение

Полупроводниковые лазеры применяются во многих областях науки и техники благодаря широкому диапазону доступных длин волн, компактности, высокой эффективности, надежности, низкой стоимости и простоте использования. В последнее время большое внимание уделяется исследованию и созданию светоизлучающих сред на основе $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ структур, которые характеризуются регулируемой от 3,4 (для GaN) до 6,1 эВ (для AlN) запрещенной зоной с прямыми оптическими переходами между зоной проводимости и валентной зоной [1–3]. Это делает их перспективными для изготовления светоизлучающих устройств в широкой области спектра — от ультрафиолетового до ближнего инфракрасного [4–7]. В работе [8] при возбуждении низкоэнергетическим электронным пучком с энергией до 20 кэВ и мощностью до 200 кВт изучалась люминесценция сильнолегированных кремнием $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ структур с различным содержанием алюминия (x), выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии

на сапфировых подложках. В спектрах катодолуминесценции $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ структур с $x > 0,42$ наблюдалось широкополосное излучение, охватывающее весь видимый и ближний инфракрасный спектральный диапазон с $\lambda = 460\text{--}720 \text{ нм}$ (1,72–2,70 эВ); краевая люминесценция при этом оказалась пренебрежимо малой. Позже было показано [9], что эта люминесценция связана с переходами донорно-акцепторных пар (ДАП). При возбуждении слоев $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ линейным электронным пучком излучение, регистрируемое с торца образцов, имеет модовую структуру и демонстрирует свойства сверхизлучения. Это дает основание полагать, что на основе $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ структур в одном излучающем элементе могут быть созданы когерентные и некогерентные источники света с различными длинами волн, в том числе и перестраиваемые в широком диапазоне спектра.

Целью данной работы было изучение спектральных характеристик спонтанной и стимулированной люминесценции структур $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ и определение их усилительных свойств.

1. Экспериментальная установка

Структуры для исследований выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Технология синтеза и измерение параметров пленок описаны в [9, 10]. В качестве источника легирующих атомов

* Петр Артемович Бохан (bokhan@isp.nsc.ru); Константин Сергеевич Журавлев (zhur@isp.nsc.ru); Дмитрий Эдуардович Закревский (zakrdm@isp.nsc.ru); Тимур Валерьевич Малин (mal-tv@isp.nsc.ru); Игорь Васильевич Осинных (osinus-sb@yandex.ru); Николай Васильевич Фатеев (fateev@isp.nsc.ru).

кремния использовалась смесь силана и азота. В пленках $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ с увеличением x концентрация кремния составляла $n_{\text{Si}} \approx (3-1) \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$, а концентрация свободных электронов $n_e \approx (24,0-0,1) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ [11]. Синтезировались два типа структур. Первый тип – структуры $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}/\text{Al}_2\text{O}_3$. Пленки $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ разного состава с $x = 0,42-1,00$ и толщиной $h_0 = 1,2 \text{ мкм}$ выращивались на (0001) ориентированных нитрированных сапфировых подложках толщиной $h = 430 \text{ мкм}$ с буферным слоем AlN толщиной $h_p = 320 \text{ нм}$. Второй тип – структуры $\text{AlN}/\text{Al}_{0,6}\text{Ga}_{0,4}\text{N}/\text{AlN}/\text{Al}_2\text{O}_3$ с $h_{p1} = 25 \text{ нм}$, $h_0 = 600 \text{ нм}$, $h_{p2} = 250 \text{ нм}$ и $h = 430 \text{ мкм}$. Все образцы имели форму параллелограммов размерами $15 \times 10 \text{ мм}^2$ и были получены путем скола структур по кристаллографическим плоскостям сапфира.

В работе изучались люминесцентные свойства синтезированных структур при оптической накачке со стороны пленки AlGaIn излучением Nd:YAG -лазера с $\lambda = 266 \text{ нм}$, длительностью импульса по полувысоте 8 нс и частотой повторения 10 Гц . Излучение направлялось перпендикулярно поверхности образца и имело вид однородной полоски шириной $z = 0,04 \text{ см}$ с регулируемой длиной зоны возбуждения $L = 0-1 \text{ см}$ (с шагом 10 мкм). Все эксперименты выполнялись при комнатной температуре. Измерения фотолюминесценции (ФЛ) проводились в геометрии обратного рассеяния под углом 45° к плоскости образца и со стороны его сколотого края. Спектры регистрировались в диапазоне $200-750 \text{ нм}$ спектрометром со спектральным разрешением $\sim 0,5 \text{ нм}$. Для точных спектральных измерений люминесценции применялся монохроматор. Для измерения оптического усиления в исследуемых структурах использовался однопроходный метод [12]. Появление стимулированной люминесценции идентифицировалось по экспоненциальному росту интенсивности люминесценции с увеличением длины зоны возбуждения и по формированию модовой структуры излучения от сколотого края образца.

2. Результаты экспериментов и обсуждение

Типичные спектры ФЛ структур 1-го типа – $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}/\text{Al}_2\text{O}_3$ с $x = 0,74; 0,6$ и $0,5$, измеренные в геометрии обратного рассеяния, приведены на рис. 1, а и от сколотого края (торца структуры) – на рис. 1, б, для структур 2-го типа – $\text{AlN}/\text{Al}_{0,6}\text{Ga}_{0,4}\text{N}/\text{AlN}/\text{Al}_2\text{O}_3$ – на рис. 1, в. Как и при накачке электронным пучком [8], для всех образцов с $x > 0,4$ спектры ФЛ, измеренные в геометрии обратного рассеяния, содержат одну широкую полосу, при этом краевые полосы не наблюдаются. С увеличением x полосы излучения сдвигаются в УФ-область, а ширина спектра по полной ширине изменяется мало: $\Delta\lambda \approx 300 \text{ нм}$. В противоположность этому спектры ФЛ, регистрируемые от сколотого края образцов, расщепляются на почти эквидистантные пики. Например, для структуры $\text{Al}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{N}$ максимумы полос ФЛ приходятся на

$\lambda \approx 435; 477; 528; 595$ и 680 нм с интервалом между ними $\sim 2100 \text{ см}^{-1}$.

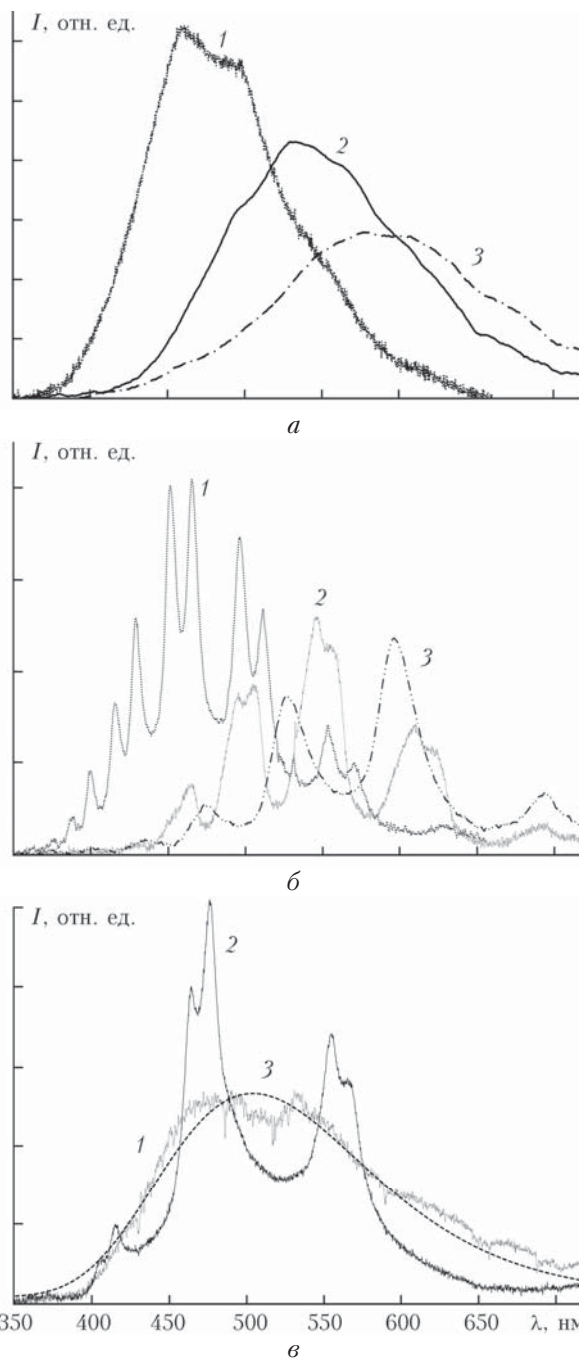


Рис. 1. Спектры ФЛ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$: 1 – $\text{Al}_{0,74}\text{Ga}_{0,26}\text{N}/\text{AlN}$, 2 – $\text{Al}_{0,6}\text{Ga}_{0,4}\text{N}/\text{AlN}$, 3 – $\text{Al}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{N}/\text{AlN}$ в геометрии обратного рассеяния (а); с торца структуры (б) и $\text{AlN}/\text{Al}_{0,6}\text{Ga}_{0,4}\text{N}/\text{AlN}$ (в): 1 – в геометрии обратного рассеяния, 2 – с торца структуры, 3 – аппроксимация распределением Гаусса при плотности мощности накачки $P_p = 300 \text{ кВт/см}^2$

На рис. 2 представлены спектры ФЛ для $\text{Al}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{N}$ при различных плотностях мощности возбуждения накачки $P_p \approx 0,006; 0,2; 4; 40; 100$ и 1000 кВт/см^2 .

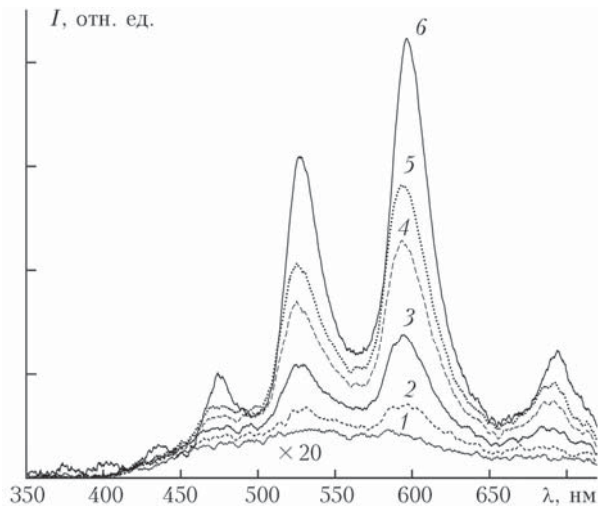


Рис. 2. Спектры люминесценции структуры $\text{Al}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{N}$ при плотности мощности накачки $P_p = 0,006$ (1); 0,2 (2); 4 (3); 40 (4); 100 (5); 1000 $\text{кВт}/\text{см}^2$ (6) ($L = 1,2$ мм)

На рис. 3 показаны зависимости интенсивности ФЛ от P_p для $\text{Al}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{N}$ в геометрии обратного рассеяния (1, 2) и от сколотого края (3, 4) при разных длинах зоны возбуждения $L = 0,6$ и $1,2$ мм. Интенсивность ФЛ, измеренная от сколотого края, резко возрастает при $P_p \approx 15\text{--}100$ $\text{кВт}/\text{см}^2$ и после этого меняется практически линейно с ростом мощности накачки. Поведение интенсивности ФЛ в геометрии обратного рассеяния близко к линейной зависимости во всем диапазоне изменения P_p .

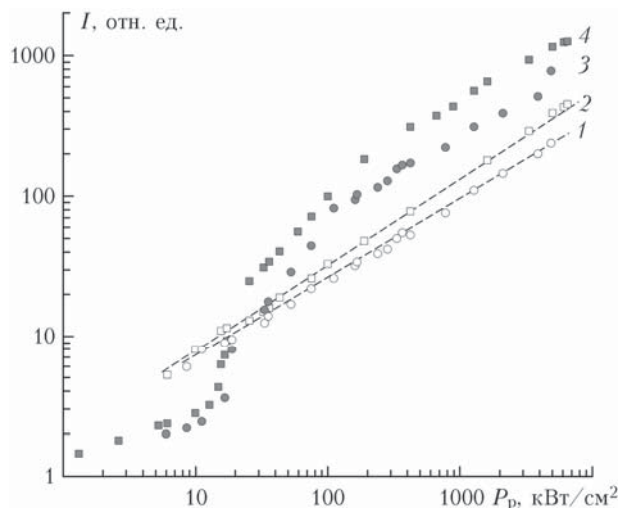


Рис. 3. Спектры люминесценции структуры $\text{Al}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{N}$: 1, 2 – в геометрии обратного рассеивания; 3, 4 – от торца структуры; $\lambda = 560$ (1, 2) и 528 нм (3, 4); $L = 0,6$ (1, 3) и $1,2$ мм (2, 4)

Спектральные характеристики излучения определяются параметрами образованного волновода. Для примера рассмотрим структуру $\text{Al}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{N}/\text{AlN}/\text{Al}_2\text{O}_3$, которая состоит из пленки AlGaN с показателем преломления $n_1 \approx 2,244$ [13], буферного слоя AlN с $n_2 \approx 2,085$ [14] и сапфировой подложки с $n_3 \approx 1,77$ [14] (показатели преломления

приведены для $\lambda = 530$ нм). Внешние поверхности структуры контактируют с воздухом с $n_0 \approx 1$. В этом случае $n_1 > n_2 > n_3 > n_0$ и, следовательно, существует несколько критических углов падения излучения на границы раздела сред $\Theta_{\text{кр}}$: $\Theta_{10} = \arcsin \frac{n_0}{n_1} \approx 26,5^\circ$ на границе $\text{Al}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{N}$ –воздух;

$\Theta_{12} = \arcsin \frac{n_2}{n_1} \approx 68^\circ$ на границе $\text{Al}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{N}$ – AlN

и $\Theta_{23} = \arcsin \frac{n_3}{n_2} \approx 58,3^\circ$ на границе AlN – Al_2O_3 .

Пучки, идущие из любой точки внутри пленки AlGaN , испытывают полное внутреннее отражение при углах падения, превышающих критические углы [15]. Расчеты по формулам Френеля [15] показывают, что коэффициент отражения на границе раздела пленки $\text{Al}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{N}$ и буферного слоя AlN из-за небольшой разницы между показателями преломления контактирующих сред мал ($\sim 0,14\%$). В результате излучение из $\text{Al}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{N}$ эффективно проникает в AlN и полное внутреннее отражение этого излучения происходит при углах падения более $\Theta_{13} = \arcsin \frac{n_3}{n_1} \approx 52,1^\circ$. Таким образом, для

углов падения в области $68^\circ > \Theta > 52,1^\circ$ структуру, содержащую пленки $\text{Al}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{N}$ и AlN , можно рассматривать как единый волновод.

Вывод излучения из торца образца осуществим при условии, что угол падения на поверхность скола Θ меньше, чем угол $\Theta_{10} = 26,5^\circ$, что невозможно в идеальном случае. Поверхности реального скола имеют множество микронеоднородностей, относительно которых углы падения излучения оказываются $\Theta < \Theta_{10}$. Это и позволяет регистрировать излучение.

Световое поле в волноводе распространяется зигзагообразно из-за полного внутреннего отражения на границах структуры. Для модели самосогласованного распределения поля требуется, чтобы суммарные фазовые сдвиги в волнах, движущихся от дна пленки к вершине и обратно, были кратны 2π [15]:

$$2kn_l h \cos \Theta + \delta_1 + \delta_2 = 2\pi m, \quad (1)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; $h = h_0 + h_p$ – толщина волновода; δ_1 и δ_2 – фазовые сдвиги при полном внутреннем отражении на границах волновода; m – целое число, которое определяет порядок моды. В итоге спектральное распределение излучения состоит из совокупности эквидистантных пиков, положения и расстояние между которыми можно определить из известных параметров волновода.

Дополнительно на формирование спектрального распределения выходного излучения в волноводе влияет конкуренция мод. Максимумы свержизлучения возникают на длинах волн, на которых реализуется наибольшее усиление, когда показатель усиления $G \sim g_0 l$ достигает наибольшей величины (g_0 – коэффициент усиления на единицу длины; l – длина усиливающей области). Так как g_0 не

зависит от длины, то в случае распространения в усиливающей среде по зигзагообразному пути при полном внутреннем отражении G зависит от угла Θ : $G \sim g_0 L / \sin \Theta$. При условии $\Theta < \Theta_{кр}$ полного внутреннего отражения от стенок волновода не происходит и излучение покидает его практически без усиления. Для этой же длины волны при $\Theta = \Theta_{кр}$ усиление максимально; при $\Theta > \Theta_{кр}$ свет распространяется под большим углом — длина усиливающей области уменьшается и поэтому усиление оказывается меньше, остальные моды подавляются. Для других длин волн условие максимума выполняется уже для другого значения m .

Полученные экспериментальные данные хорошо согласуются с предложенной волноводной моделью, описываемой формулой (1). Спектральное положение пиков в спектре излучения $\lambda \approx 435$; 477; 528; 595 и 680 нм (см. рис. 2, б) соответствует $m \approx 10$; 9; 8; 7 и 6 для критического угла $\Theta_{кр} = \Theta_{13} \approx 52,1^\circ$ и $h = h_0 + h_p \approx 1,52$ мкм. Для излучения с $\lambda = 595$ нм, $m = 7$ угол падения $\Theta \approx 52,3^\circ$ ($1/\sin \Theta = 1,267$). Для той же длины волны и $m = 6$ соответствующий угол $\Theta \approx 58,5^\circ$ ($1/\sin \Theta = 1,172$). Это означает, что коэффициент усиления слабого сигнала для моды с $m = 7$ больше, чем для моды с $m = 6$ в 1,08 раза, и последняя будет ослаблена. Для $m = 8$ угол $\Theta \approx 45,8^\circ < \Theta_{кр}$, следовательно, излучение покидает волновод без усиления. Так происходит дискретизация (селекция) излучения по длинам волн в активном волноводе.

Рис. 4 показывает зависимость интенсивности ФЛ для $Al_xGa_{1-x}N$ различного типа от длины зоны возбуждения L . Интенсивность ФЛ возрастает экспоненциально с увеличением L от 0 до 1 мм; при $L > 1$ мм для структур 1-го типа она не зависит, а для структур 2-го типа растет почти пропорционально L .

Пороговый характер увеличения интенсивности излучения при росте плотности возбуждения ($P_p \geq 15$ кВт/см²) и ее экспоненциальный рост с увеличением длины области возбуждения свидетельствуют о развитии индуцированной фотолюминесценции — сверхизлучения. Интенсивность выходного излучения $I(L)$ определяется выражением [12]:

$$I(L) = (I_0 S / g) (\exp(gL) - 1), \quad (2)$$

где I_0 — мощность спонтанного излучения из единицы поперечного сечения возбужденной области; S — площадь сечения; $g = (g_1 - a)$ — наблюдаемый на опыте коэффициент усиления, g_1 — коэффициент усиления в процессе вынужденного излучения, a — коэффициент, учитывающий оптические потери за счет различных механизмов. Для структуры $Al_{0,5}Ga_{0,5}N/AlN$ при плотности мощности накачки $P_p \approx 220$ кВт/см² усиление на единицу длины зоны возбуждения, рассчитанное по формуле (2) на основании полученных результатов (рис. 4), $g_0 \approx 14,5$ см⁻¹. Глубина поглощения излучения накачки и диффузионная длина носителей заряда определяют глубину возбуждаемой области. Энергия фотонов $\sim 4,66$ эВ для $\lambda = 266$ нм лежит в области межзонных пере-

ходов в AlGa_xN, где коэффициент поглощения составляет около $(1,0-1,5) \cdot 10^5$ см⁻¹. Это соответствует глубине проникновения менее 100 нм [16]. Расширение возбужденной области в поперечном направлении происходит также в процессе диффузии электронно-дырочных пар. Диффузионная длина в AlGa_xN не превышает 150 нм [17]. Таким образом, можно принять, что толщина возбужденной области в структуре $Al_{0,5}Ga_{0,5}N$ не превышает 250 нм. Следовательно, из-за зигзагообразного пути распространения света в волноводе, а также ограниченной глубины проникновения излучения накачки в некоторые среды реальный коэффициент усиления g_0 на единицу длины достигает 70 см⁻¹ в структуре $Al_{0,5}Ga_{0,5}N$; $g_0 \approx 20$ см⁻¹ в $Al_{0,74}Ga_{0,26}N/AlN$ и $g_0 \approx 44$ см⁻¹ в $AlN/Al_{0,6}Ga_{0,4}N/AlN$.

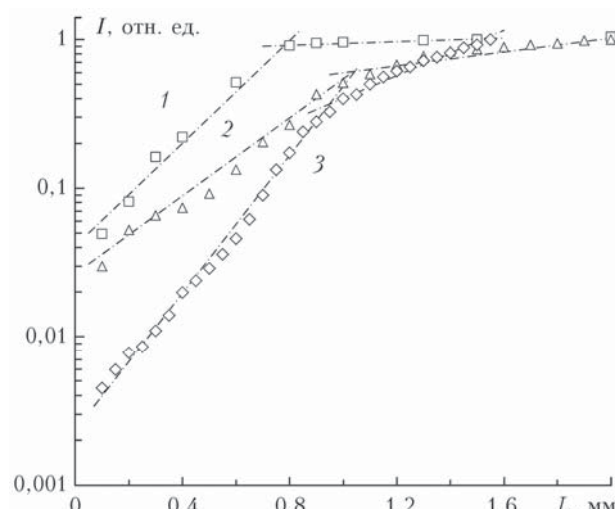


Рис. 4. Интенсивность ФЛ в зависимости от длины зоны возбуждения L : 1 — $Al_{0,74}Ga_{0,26}N/AlN$, $\lambda \approx 468$ нм; 2 — $Al_{0,5}Ga_{0,5}N/AlN$, $\lambda \approx 528$ нм; 3 — $AlN/Al_{0,6}Ga_{0,4}N/AlN$, $\lambda \approx 475$ нм ($P_p = 220$ кВт/см²)

Совокупность экспериментальных результатов показывает, что основным физическим механизмом, приводящим к появлению широкополосного излучения в легированных пленках AlGa_xN, является рекомбинация донорно-акцепторных пар [9]. Энергетические параметры излучения отдельной донорно-акцепторной пары зависят от расстояния r между донором и акцептором. Радиус r определяет энергию фотона, испущенного при переходе ДАП:

$$E_{hv} = E_g - E_D - E_A + e^2 / \epsilon r, \quad (3)$$

где E_g — ширина запрещенной зоны; E_D и E_A — энергии уровней доноров и акцепторов; e — заряд электрона; ϵ — диэлектрическая проницаемость структуры. Контур линии излучения отдельной ДАП однородный. Поскольку существует распределение большого количества ДАП с различными r , то их нельзя рассматривать как полностью независимые излучатели. Совокупность узких перекрывающихся линий образует сплошной контур с неоднородным характером уширения (см. рис. 1, в). Для получения индуцированной фотолюминесцен-

ции необходима инверсная заселенность рабочих уровней. Верхним и нижним уровнями в рассматриваемой среде служат донорные и акцепторные состояния соответственно. Рассматриваемая модель генерации излучения соответствует 4-уровневой лазерной схеме. Она состоит из четырех этапов возбуждения и излучения: 1) энергетическое возмущение возбуждает электроны из валентной зоны в зону проводимости; 2) быстрый захват неравновесных электронов на донорные уровни; 3) излучение света при донорно-акцепторной рекомбинации; 4) быстрая релаксация электронов с акцепторных состояний в валентную зону.

Заключение

Исследованы спектральные характеристики фотолуминесценции сильнолегированных кремнием с $n_{Si} > 10^{20} \text{ см}^{-3}$ структур $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ с $x = 0,5-1,0$ различного дизайна при оптической импульсной накачке с $\lambda = 266 \text{ нм}$. Полученное доминирующее широкополосное излучение с шириной $\sim 300 \text{ нм}$ охватывает весь видимый диапазон. Излучение от скола структуры расщепляется на узкие почти эквидистантные компоненты, определяемые модовой структурой образованного плоского волновода. Результаты указывают на стимулированный характер излучения. Измеренные коэффициенты усиления находятся в диапазоне $20-70 \text{ см}^{-1}$. Совокупность полученных данных свидетельствует о перспективности использования сильнолегированных структур $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ в качестве рабочих сред для лазеров, перестраиваемых в широком диапазоне длин волн в единичном активном элементе.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-02-00018.

1. *III-Nitride Based Light Emitting Diodes and Applications* / T.-Y. Seong, J. Han, H. Amano, H. Morkoc (eds). Singapore: Springer, 2013. V. 126. 390 p.
2. *Sizov D., Bhat R., Zah Ch.-E.J.* Gallium indium nitride-based green lasers // *J. Lightwave Technol.* 2012. V. 30. P. 679–699.
3. *Razeghi M., Henini M.* Optoelectronic Devices: III – Nitrides. Amsterdam: Elsevier, 2004. 575 p.
4. *Moustakas Th.D.* Ultraviolet optoelectronic devices based on AlGaIn alloys grown by molecular beam epitaxy // *MRS Commun.* 2016. V. 6. P. 247–269.
5. *Луценко Е.В., Ржеуцкий Н.В., Павловский В.Н., Яблонский Г.П., Нечаев Д.В., Ситникова А.А., Ратников В.В., Кузнецова Я.В., Жмерик В.Н., Иванов С.В.*

Спонтанное и стимулированное излучение в среднем ультрафиолетовом диапазоне квантово-размерных гетероструктур на основе AlGaIn-соединений, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках с-сапфира // *Физика твердого тела.* 2013. Т. 55. С. 2058–2066.

6. *Kneissl M., Kolbe T., Chua C., Kueller V., Lobo N., Stellmach J., Knauer A., Rodriguez H., Einfeldt S., Yang Z., Johnson N.M., Weyers M.* Advances in group III-nitride-based deep UV light-emitting diode technology // *Semicond. Sci. Technol.* 2011. V. 26. P. 014036.
7. *Nakamura S., Pearton S., Fasol G.* The blue laser diode. Berlin: Springer, 2000. 368 p.
8. *Bokhan P.A., Gugin P.P., Zakrevsky Dm.E., Zhuravlev K.S., Malin T.V., Osinnykh I.V., Solomonov V.I., Spirina A.V.* Luminescence and superradiance in electron-beam-excited $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ // *J. Appl. Phys.* 2014. V. 116. P. 113103.
9. *Osinnykh I.V., Malin T.V., Plyusnin V.F., Suranov A.S., Gilinsky A.M., Zhuravlev K.S.* Characterization of the green band in photoluminescence spectra of heavily doped $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}:\text{Si}$ with the Al content $x > 0.5$ // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2016. V. 55. P. 05FG09.
10. *Zhuravlev K.S., Osinnykh I.V., Protasov D.Yu., Malin T.V., Davydov V.Yu., Smirnov A.N., Kyutt R.N., Spirina A.V., Solomonov V.I.* Characterization of MBE-grown AlGaIn layers heavily doped using silane // *Phys. Status Solidi C.* 2013. V. 10. P. 315–318.
11. *Osinnykh I.V., Malin T.V., Plyusnin V.F., Zhuravlev K.S., Ber B.Ya., Kazantsev D.Yu.* Nature of intensive defect-related broadband luminescence of heavily doped $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}:\text{Si}$ layers // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2017. V. 816. P. 012002.
12. *Shaklee K.L., Nahory R.E., Leheny R.F.* Optical gain in semiconductors // *J. Lumin.* 1973. V. 7. P. 284–309.
13. *Sanford N.A., Robins L.H., Davydov A.V., Shapiro A., Tsvetkov D.V., Dmitriev A.V., Keller S., Mishra U.K., DenBaars S.P.* Refractive index study of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ films grown on sapphire substrates // *J. Appl. Phys.* 2003. V. 94. P. 2980–2991.
14. *Antoine-Vincent N., Natali F., Mihailovic M., Byrne D., Semond F., Massies J.* Determination of the refractive indices of AlN, GaN, and $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ grown on (111)Si substrates // *J. Appl. Phys.* 2003. V. 93. P. 5222–5226.
15. *Kogelnik H.* An introduction to integrated optics // *IEEE Trans. Microw. Theory Techniq.* 1975. V. 23. P. 2–16.
16. *Malin T.V., Gilinsky A.M., Mansurov V.G., Protasov D.Yu., Kozhuhov A.S., Yakimov E.B., Zhuravlev K.S.* Increase in the diffusion length of minority carriers in $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ alloys ($x = 0-0.1$) fabricated by ammonia molecular beam epitaxy // *Semiconductors.* 2015. V. 49. P. 1285–1289.
17. *Kück S.* Laser-related spectroscopy of ion-doped crystals for tunable solid-state lasers // *Appl. Phys. B.* 2001. V. 72. P. 515–562.

P.A. Bokhan, K.S. Zhuravlev, D.E. Zakrevsky, T.V. Malin, I.V. Osinnykh, N.V. Fateev. Broadband spontaneous and stimulated luminescence of strongly doped $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ structures.

The spectral characteristics of the spontaneous and stimulated luminescence of strongly silicon-doped $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ structures with the concentration $n_{Si} > 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, at the optical pulse pumping by radiation with $\lambda = 266 \text{ nm}$, are studied. The obtained dominant broadband radiation with a full width at half maximum $\sim 150 \text{ nm}$ covers the whole visible spectral range. The radiation spectrum from the end of the structure is split into the narrow components determined by the formed flat waveguide mode structure. The results are indicative of the stimulated radiation character. The measured amplification coefficients values for different structures are in the range $20-70 \text{ cm}^{-1}$.