

07

## Усиление излучения в легированных AlGaN-структурах при оптической накачке

© П.А. Бохан<sup>1</sup>, К.С. Журавлёв<sup>2</sup>, Дм.Э. Закревский<sup>1,¶</sup>,  
Т.В. Малин<sup>1</sup>, И.В. Осинных<sup>1</sup>, Н.В. Фатеев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН,  
Новосибирск

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет

¶ E-mail: zakrdm@isp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 17 июля 2016 г.

При оптической накачке импульсным лазерным излучением с  $\lambda = 266$  nm твердых растворов  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}$  с  $x = 0.5$  и  $0.74$ , синтезированных методом молекулярно-лучевой эпитаксии, исследованы спектральные характеристики спонтанной и стимулированной люминесценции. Получены широкополосные спектры излучения с шириной  $\sim 260$  THz для  $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}$  и  $\sim 360$  THz для  $\text{Al}_{0.74}\text{Ga}_{0.26}\text{N}$ . Измеренные коэффициенты усиления на  $\lambda \approx 528$  nm для  $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}$  равны  $g \approx 70$   $\text{cm}^{-1}$ , а для  $\text{Al}_{0.74}\text{Ga}_{0.26}\text{N}$  на  $\lambda \approx 468$  nm  $g \approx 20$   $\text{cm}^{-1}$ .

DOI: 10.21883/PJTF.2017.01.44083.16442

Полупроводниковые лазеры сине-зеленого и ближнего УФ диапазонов спектра активно используются во многих областях науки и техники вследствие широкого набора доступных длин волн, компактности, эффективности, надежности, малой стоимости и простоты эксплуатации. Перспективной лазерной средой является твердый раствор  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  с регулируемой шириной запрещенной зоны в диапазоне 3.5–6.2 eV [1]. В работе [2] была исследована люминесценция сильно легирован-

ных кремнием соединений  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  различного компонентного состава при возбуждении низкоэнергетическими (до 20 keV) электронными пучками. Для структур с  $x > 0.42$  получена широкополосная люминесценция, охватывающая диапазон спектра от 1.72 до 2.7 eV (460–720 nm), причем краевая люминесценция не наблюдалась. При импульсной мощности электронного пучка более 200 kW в этом спектральном диапазоне была получена стимулированная люминесценция [2]. Ранее подобное широкополосное излучение наблюдалось в спектрах катодолюминесценции пленки  $\text{Al}_{0.37}\text{Ga}_{0.63}\text{N}$  при 77 K [3], причем ее интенсивность была на порядок слабее, чем интенсивность краевой люминесценции. В настоящее время предполагается, что подобная люминесценция связана с оптическими переходами через уровни дефектов [4], состоящих из атома примеси и точечного дефекта кристаллической решетки [5].

Целью данной работы являлось исследование спектральных характеристик спонтанной и стимулированной люминесценции твердых растворов  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  при комнатной температуре и измерение коэффициента усиления активной среды при оптической накачке.

Исследуемые слои  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  с  $x = 0.5$  и  $x = 0.74$  толщиной  $h_0 \approx 1.2 \mu\text{m}$  выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии в модифицированной установке СВЕ-32 фирмы Riber с использованием аммиака в качестве источника активного азота на буферном слое  $\text{AlN}$  толщиной  $h_p \approx 320 \text{ nm}$  на (0001) ориентированных сапфировых подложках толщиной 400  $\mu\text{m}$  при температуре подложки 860°C и потоке аммиака 130 sccm [6]. Слои  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  были легированы кремнием. В качестве источника легирования использовался газовый источник моносилана  $\text{SiH}_4$ . Концентрация свободных электронов в  $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}$  составляла  $n_e \approx 1.4 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , а  $\text{Al}_{0.74}\text{Ga}_{0.26}\text{N}$  —  $n_e \approx 0$ . Геометрические размеры образцов составляли  $15 \times 10 \text{ mm}$ . Грани образцов подготавливались для вывода излучения люминесценции методом скалывания, отражающие покрытия не наносились.

Накачка исследуемых образцов осуществлялась со стороны пленки твердого раствора  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  импульсным излучением четвертой гармоники Nd:YAG-лазера с  $\lambda = 266 \text{ nm}$ , длительностью импульса на полувысоте  $\sim 8 \text{ ns}$  и частотой повторения до 10 Hz. На поверхности пленки  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  формировался световой пучок с однородным близким к гауссовому распределением с шириной 370  $\mu\text{m}$  и длиной 1 cm. Длина возбуждаемой области  $L$  могла меняться в диапазоне от 0 до 1 cm

с шагом  $10 \mu\text{m}$ . Максимальная импульсная плотность мощности на поверхности образца составляла  $\sim 2.2 \cdot 10^5 \text{ W/cm}^2$  с неоднородностью ее интенсивности вдоль длины, не превышающей 10%.

Спектры люминесценции регистрировались с помощью оптического спектрометра, оснащенного ПЗС-линейкой в диапазоне 200–750 nm, и одновременно измерялась интенсивность излучения на фиксированной длине волны с помощью фотоэлектронного умножителя. Спонтанное излучение регистрировалось в направлении, перпендикулярном поверхности образцов. Стимулированная фотолюминесценция изучалась при регистрации излучения с торца исследуемого образца, а ее наличие идентифицировалось по поведению интенсивности выходного излучения  $I(L)$  при увеличении  $L$ .

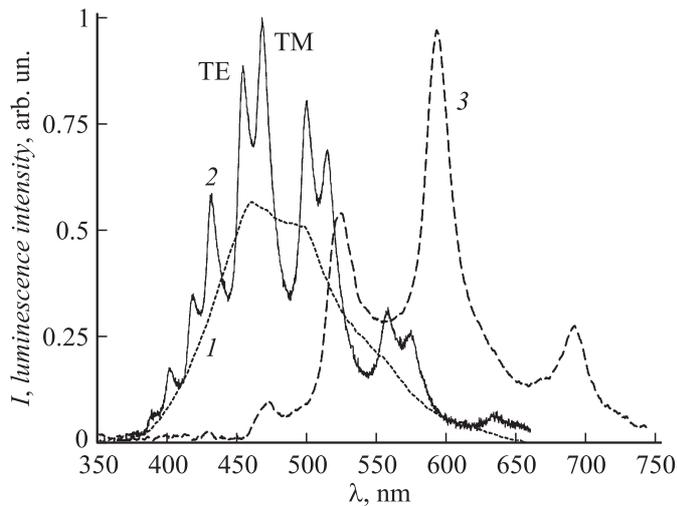
Для измерения оптического усиления использовалась методика измерения однопроходного усиления света [7]. Прямым свидетельством наличия усиления является экспоненциальный рост интенсивности излучения из возбужденной области структуры при изменении ее длины. Интенсивность выходного излучения  $I(L)$  из торца образца при увеличении  $L$  определяется согласно выражению [7]:

$$I(L) = (I_s A/g)(\exp(gL) - 1), \quad (1)$$

где  $I_s$  — мощность спонтанного излучения из единицы объема,  $A$  — площадь поперечного сечения возбужденной области,  $g = (g_1 - a)$  — экспериментально наблюдаемый коэффициент усиления,  $g_1$  — усиление за счет процесса стимулированного излучения,  $a$  — оптические потери.

На рис. 1 представлены характерные спектры спонтанной  $I$  и стимулированной 2, 3 люминесценции при воздействии возбуждающего излучения полоской длиной 1 см. Для  $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}$  ширина спектра составила  $\sim 260 \text{ THz}$ , а  $\text{Al}_{0.74}\text{Ga}_{0.26}\text{N}$   $\sim 360 \text{ THz}$ . В спектрах, регистрируемых с торца структуры, при накачке, имеющей преимущественное направление возбуждения, наблюдается расщепление „гладких“ полос спонтанного излучения на практически равноудаленные компоненты с  $\lambda \approx 477, 528, 595$  и  $680 \text{ nm}$  для  $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}$  и с  $\lambda \approx 400, 428, 462, 508, 560$  и  $640 \text{ nm}$  для  $\text{Al}_{0.74}\text{Ga}_{0.26}\text{N}$ .

На рис. 2, а представлены спектры стимулированной люминесценции при трех значениях плотности мощности накачки  $W = 6, 115$  и  $220 \text{ kW/cm}^2$ . Интенсивность полосы излучения вначале быстро возрастает с увеличением плотности мощности накачки, а затем имеет

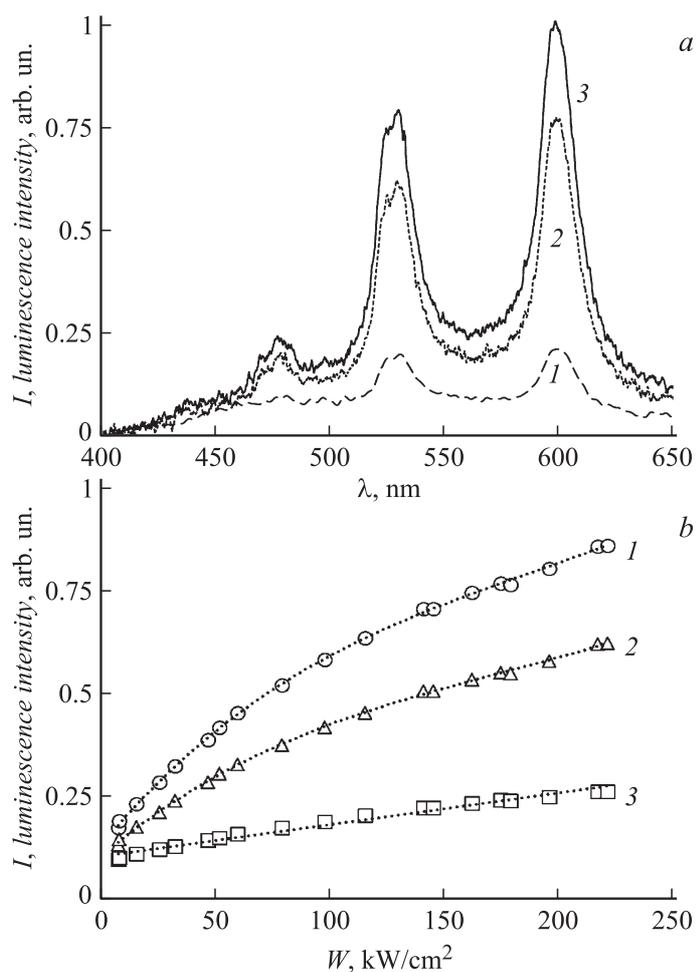


**Рис. 1.** Спектры фотолюминесценции структур  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ .  $x = 0.74$  (1, 2),  $x = 0.5$  (3). Спонтанная люминесценция (1); стимулированная люминесценция (2, 3).

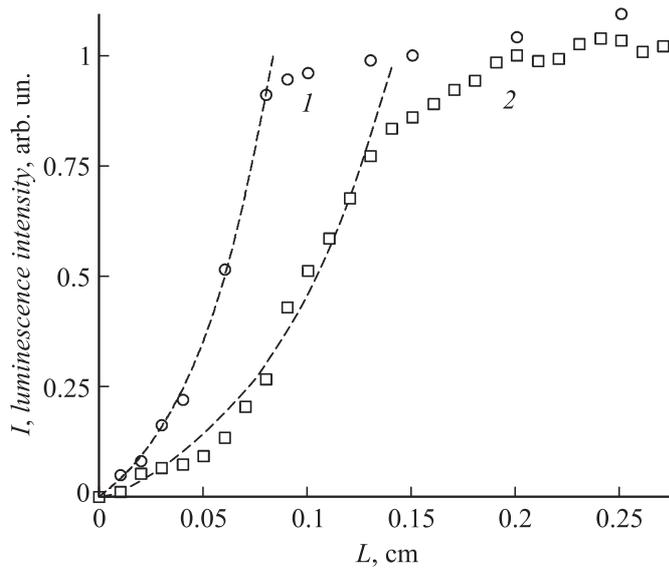
тенденцию к насыщению (рис. 2, *b*, зависимости 1, 2). Зависимость интенсивности спонтанного излучения (зависимость 3) близка к линейной.

На рис. 3 представлены результаты измерений интенсивности выходного излучения  $I(L)$  из торца исследуемых образцов. Полученные зависимости  $I$  при увеличении  $L$  характеризуются быстрым ростом с последующим постепенным насыщением сигнала люминесценции. Здесь же для быстрой части приведены аппроксимации экспериментальных значений  $I(L)$  методом наименьших квадратов по формуле (1) в диапазоне  $L = 0-0.13$  см, из которых определялись величины  $g$ .

Исследуемые образцы  $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}/\text{AlN}$  и  $\text{Al}_{0.74}\text{Ga}_{0.26}\text{N}/\text{AlN}$  на сапфире представляют собой волноводную структуру, состоящую из пленки  $\text{AlGaN}$  с показателем преломления  $n_1$ , из буферного слоя  $\text{AlN}$  с  $n_2$  и сапфировой подложки  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с  $n_3$ . Например, для  $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}/\text{AlN}$   $n_1 \approx 2.224$  [8],  $n_2 \approx 2.085$  [9] и  $n_3 \approx 1.77$  (коэффициенты преломления приведены для  $\lambda = 530$  nm). Внешние поверхности волноводной структуры граничат с воздухом с  $n_0 \approx 1$ . В этом случае справедливо



**Рис. 2.** *a* — спектры люминесценции структуры  $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}$  при различных значениях плотности мощности накачки импульсного излучения:  $\lambda = 528$  nm,  $W = 6$  (1), 115 (2), 220 (3)  $\text{kW}/\text{cm}^2$ . *b* — зависимость интенсивности люминесценции структуры  $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}$ : 1, 2 — стимулированная люминесценция с  $\lambda = 598$  (1), 528 (2) nm, 3 — спонтанное излучение.



**Рис. 3.** Зависимости интенсивности люминесценции от длины области возбуждения структур  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ .  $x = 0.74$  (1),  $x = 0.5$  (2).

неравенство  $n_1 > n_2 > n_3 > n_0$ , и поэтому существуют несколько критических углов  $\arcsin \Theta_{01} = n_1/n_0$  на границах  $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}$  — воздух ( $\Theta_{01} \approx 26.46^\circ$ ),  $\arcsin \Theta_{12} = n_1/n_2 \approx 68^\circ$  на границе  $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}$ — $\text{AlN}$  и  $\arcsin \Theta_{23} = n_3/n_2$  на границе  $\text{AlN}$ — $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $\Theta_{23} \approx 58.1^\circ$ ). Лучи, идущие из любой точки внутри пленки  $\text{AlGaIn}$ , под углами большими этих значений испытывают полное внутреннее отражение. Расчеты по формулам Френеля показывают, что коэффициент отражения излучения от границы структуры  $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}$ — $\text{AlN}$  незначителен ( $\sim 0.14\%$ ) из-за малых различий в коэффициентах преломления контактирующих сред и малой толщины буферного слоя ( $h_p < \lambda$ ). Вследствие этого излучение из  $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}$  эффективно проникает в  $\text{AlN}$  и испытывает полное внутреннее отражение при углах падения больших, чем угол  $\Theta_{23} \approx 58.1^\circ$ . Таким образом, в первом приближении в пределах угла  $68^\circ > \Theta > 58.1^\circ$  структуру  $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}$ — $\text{AlN}$  можно рассматривать как

единый волновод с локализацией световой энергии, через который и распространяется излучение.

Световое поле в волноводном слое можно представить в виде двух плоских ТЕ- и ТМ-волн, наблюдаемых на рис. 1 (кривая 2). Эти моды, которые распространяются в волноводе по зигзагообразному пути, испытывая на границах слоев полное внутреннее отражение, имеют взаимно перпендикулярную поляризацию. Для получения самосогласованной картины распределения поля необходимо, чтобы суммарный фазовый сдвиг при распространении  $\Theta_m$  удовлетворяет условию [10]

$$2kn_1h \cos \Theta_m + \delta_1 + \delta_2 = 2\pi m, \quad (2)$$

где  $k = 2\pi/\lambda$  — волновое число,  $h = h_0 + h_p$  — толщина волновода,  $m$  — целое число,  $\delta_1$  и  $\delta_2$  — фазовые сдвиги при полном внутреннем отражении от подложки и воздушного слоя соответственно. Это уравнение позволяет рассчитать межмодовые интервалы и длины волн выходного излучения.

Для вывода излучения для моды, распространяющейся под углом падения  $\Theta_m \approx 52.1^\circ$  ( $\sin \Theta_m = n_1/n_3$  при условии, что  $h_p < \lambda$ ) из волноводной структуры, использовался неконтролируемый скол торца образца. При меньших углах падения ( $52.1^\circ > \Theta_m > 26.46^\circ$ ) возможен эффективный вывод излучения посредством вытекающих мод.

Полученные экспериментальные данные согласуются с рассматриваемой волноводной моделью [10]. Так для  $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}$  для  $\lambda \approx 528 \text{ nm}$ ,  $\Theta_m \approx 52.1^\circ$  и  $h \approx 1.52 \mu\text{m}$  расчет из (2) дает  $m \approx 8$  (фазовые сдвиги  $\delta_1$  и  $\delta_2$  при полном внутреннем отражении определялись из формул Френеля). Спектральное положение пиков в спектре излучения  $\lambda \approx 477$  и  $598 \text{ nm}$  на рис. 1 (кривая 3) согласуется с этой моделью для  $m \approx 9$  и  $7$  соответственно. Для  $\text{Al}_{0.74}\text{Ga}_{0.26}\text{N}$  пики в спектре излучения соответствуют  $m \approx 7-11$ .

Определенная из формулы (1) величина коэффициента усиления излучения в структуре для  $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}$  с  $\lambda \approx 528 \text{ nm}$  равна  $g \approx 14.5 \text{ cm}^{-1}$ , а для  $\text{Al}_{0.74}\text{Ga}_{0.26}\text{N}$  с  $\lambda \approx 468 \text{ nm}$  равна  $g \approx 25.2 \text{ cm}^{-1}$  при плотности мощности накачки  $\sim 2.2 \cdot 10^5 \text{ W/cm}^2$ . С учетом зигзагообразного распространения излучения в волноводе (действительный путь распространения больше) величину коэффициента усиления надо считать меньшей  $g^* = g \sin \Theta_m \approx 11.4$  и  $20 \text{ cm}^{-1}$  соответственно.

Глубина возбужденной области образца определяется степенью проникновения излучения накачки в поглощающий слой и диффузи-

ей носителей заряда. Для структуры  $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}$  излучение накачки (4.66 eV) попадает в область межзонных переходов и полностью поглощается с коэффициентом поглощения  $k \approx (1.5-2.0) \cdot 10^5 \text{ cm}^{-1}$  [11]. Это соответствует толщине области возбуждения менее 100 nm. Расширение области активного слоя в поперечном направлении также происходит за счет диффузии электронно-дырочных пар из области оптического возбуждения. Длина диффузии в слоях AlGaN не превышает 150 nm [12]. Таким образом, можно считать, что активная область занимает в поперечном направлении менее  $0.25 \mu\text{m}$ . Учитывая это, реальный коэффициент усиления будет равен  $g \approx 70 \text{ cm}^{-1}$ . Для  $\text{Al}_{0.74}\text{Ga}_{0.26}\text{N}$  измеренный  $k \approx (1.8-2.1) \cdot 10^3 \text{ cm}^{-1}$ , что соответствует только  $\sim 23\%$  поглощения мощности накачки, поэтому  $g \approx 20 \text{ cm}^{-1}$ .

В результате проведенных исследований получена сверхширокополосная люминесценция при оптическом возбуждении твердых растворов  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}$  на сапфире с  $x = 0.5$  и  $0.74$  импульсным излучением с  $\lambda = 266 \text{ nm}$ . Исследование спектральных характеристик излучения продемонстрировало расщепление полосы спонтанного излучения на равноудаленные компоненты. Это явление характерно для сверхсветимости в планарном волноводе при распространении света под углом, близким к углу полного внутреннего отражения. Измеренные коэффициенты усиления на  $\lambda \approx 528 \text{ nm}$  для  $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}$  равны  $g \approx 70 \text{ cm}^{-1}$ , а для  $\text{Al}_{0.74}\text{Ga}_{0.26}\text{N}$  на  $\lambda \approx 468 \text{ nm}$   $g \approx 20 \text{ cm}^{-1}$ .

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение о субсидии № 14.613.21.0039 от 11.11.2015 (уникальный идентификатор проекта RFMEFI61315X0039).

## Список литературы

- [1] Nakamura S., Pearton S., Fasol G. The Blue Laser Diode. Springer, 2000.
- [2] Bokhan P.A., Gugin P.P., Zakrevsky Dm.E. et al. // J. Appl. Phys. 2014. V. 116. P. 113103.
- [3] Yoshida S., Misawa S., Gonda S. // J. Appl. Phys. 1982. V. 53. P. 6844–6848.
- [4] Zhao D.G., Jiang D.S., Zhu J.J. et al. // Appl. Phys. Lett. 2009. V. 95. P. 041901.
- [5] Osinnykh I.V., Malin T.V., Plyusnin V.F. et al. // Jpn. J. Appl. Phys. 2016. V. 55. P. 05FG09.
- [6] Zhuravlev K.S., Osinnykh I.V., Protasov D.Yu. et al. // Phys. Status Solidi C. 2013. V. 10. P. 315–318.

- [7] *Shaklee K.L., Leheny R.F.* // Appl. Phys. Lett. 1971. V. 18. P. 475–477.
- [8] *Sanford N.A., Robins L.H., Davydov A.V.* et al. // J. Appl. Phys. 2003. V. 94. P. 2980–2991.
- [9] *Antoine-Vincent N., Natali F., Mihailovic M.* et al. // J. Appl. Phys. 2003. V. 93. P. 5222–5226.
- [10] *Kogelnik H.* // IEEE Trans. Microwave Theory Techn. 1975. V. 23. P. 2–16.
- [11] *Muth J.F., Brown J.D., Johnson M.A.L.* et al. // MRS Internet J. Nitride Semicond. Res. 1999. V. 4S1. P. G5.2.
- [12] *Малин Т.В., Гилинский А.М., Мансуров В.Г.* и др. // ФТП. 2015. Т. 49. С. 1329–1333. (*Malin T.V., Gilinsky A.M., Mansurov V.G.* et al. // Semiconductors. 2015. V. 49. P. 1285–1289).