

Влияние наночастиц и тонких слоев Au, фталоцианина Eu и наночастиц Er на формирование спектров излучения структур с квантовыми ямами InGaN/GaN

© М.М. Мездрогина¹, М.В. Еременко², С.М. Голубенко², Е.С. Москаленко¹

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
Санкт-Петербург, Россия

E-mail: margaret.m@mail.ioffe.ru

(Поступила в Редакцию 16 марта 2011 г.
В окончательной редакции 7 июля 2011 г.)

Исследовано влияние наночастиц и тонких слоев Au, фталоцианина Eu и наночастиц Er на формирование спектров излучения структур с квантовыми ямами на основе InGaN/GaN. Показано, что влияние локализованных плазмонов на генерацию носителей определяется размерами наночастиц Au при предположении о доминирующей роли взаимодействия плазмонов с поверхностными состояниями структур. Влияние наночастиц Au на формирование спектров излучения в структурах с множественными квантовыми ямами на основе GaN/InGaN, в отличие от случая слоев Au, определяется концентрацией In. Влияние пленок фталоцианина Eu, нанесенных на поверхность исследованных структур, на их спектры фотолюминесценции аналогично влиянию легирования этих структур европием.

1. Введение

Структуры с множественными квантовыми ямами (MQW) на основе InGaN/GaN используются в качестве источников света внутри и снаружи помещений, а также для подсветки панелей дисплеев. Основной проблемой при использовании светоизлучающих приборов (LED) на основе вышеупомянутых структур является недостаточно высокая (несколько процентов) эффективность их работы. Известно, что особенностью структур с MQW на основе InGaN/GaN является существование пространственных неоднородностей, обусловленных флуктуациями состава тройного твердого раствора InGaN, вплоть до разделения фаз GaN, InN. Линейные размеры неоднородностей (квазидвумерных островков, квантовых точек, макроскопических кластеров) находятся в широком диапазоне – от нано до микрометров как в латеральной плоскости, так и в направлении роста структуры. В свою очередь, эти неоднородности влияют на процессы миграции электронных возбуждений в гетероструктурах InGaN/GaN. Следует также учесть наличие встроенных пьезоэлектрических полей, влияющих на спектры излучения и поглощения, а также на динамику носителей заряда в структурах InGaN/GaN. На основании анализа времяразрешенных спектров фотолюминесценции (ФЛ) и электролюминесценции (ЭЛ) экспериментально обнаружена корреляция между существованием встроенных электрических полей и долгоживущими локализованными состояниями, которые определяют вид спектра излучения в исследованных структурах.

Форма спектра ФЛ квантовых ям в различных структурах на основе InGaN/GaN обусловлена особенностями пространственно-энергетического распределения излу-

чающих локализованных состояний разных типов и процессами миграции возбуждения [1]. Показано, что имеющаяся в настоящее время недостаточная (несколько процентов) эффективность LED на основе III-нитридов обусловлена рядом факторов, одним из которых является малый коэффициент поглощения вследствие отражения света поверхностью структур [2,3]. Увеличение поглощения света при использовании тонких (порядка 12 nm) слоев благородных металлов Ag и Au, обладающих хорошей электропроводностью, широко применяется для увеличения эффективности LED на основе III-нитридов [4]. В настоящее время рассматривается несколько механизмов увеличения эффективности LED на основе III-нитридов при нанесении наночастиц, а также слоев благородных металлов на поверхность структур.

Цель работы состоит в исследовании влияния наночастиц и тонких слоев Au, фталоцианина Eu (EuqPc) и наночастиц Er на формирование спектров ФЛ структур с квантовыми ямами на основе InGaN/GaN.

2. Эксперимент

Оптические измерения проводились на экспериментальной установке, собранной на базе дифракционного спектрометра СДЛ-2 с обратной линейной дисперсией 1.3 nm/mm, обеспечивающей спектральное распределение 0.26 nm. Для возбуждения ФЛ использовался непрерывный He–Cd лазер с длиной волны возбуждения $\lambda = 325$ nm (межзонное возбуждение GaN) и мощностью излучения 15 mW. Для измерения спектров пропускания применялся спектрометр СФ-38.

Установка XP-1Apt M использовалась для определения концентрации металлических примесей с помощью метода рентгеновской флуоресценции. Для измерения спектров ЭЛ на поверхность структуры наносились In контакты, к которым прикладывалось постоянное электрическое напряжение от источника питания Б5-70. При измерении спектров ЭЛ использовалась та же схема регистрации, что и при измерении спектров ФЛ. Все измерения выполнены при температуре образцов T , равной 77 или 300 К.

Пленки n -GaN и структуры p -GaN/ n -GaN получены методом MOCVD на подложках из сапфира. Структуры с MQW, исследованные в настоящей работе, были также получены методом MOCVD и включали набор из пяти квантовых ям GaN/ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0.1 < x < 0.4$), вращенных на подложке из сапфира. Ширина квантовых ям составляет $\sim 2.0\text{--}2.5$ nm с барьером в ~ 7 nm [1]. Пленки Au толщиной ≤ 12 nm и пленки EuqPc различной толщины, полученные термическим напылением из вольфрамового тигля, нанесены на внешнюю сторону структур, как и в работах [2–4]. Наночастицы Au получены с использованием малой величины межфазной поверхностной энергии на границе раздела между верхним слоем структуры и металлом и большой диффузионной подвижности частиц Au по поверхности структуры путем подбора угла и оптимизации температуры нанесения наночастиц. Наночастицы Eg получены в результате травления пленок Eg в азотной кислоте.

Для определения наличия частиц Au в работе использовались следующие методики: рентгеновская флуоресценция, сопоставление спектров пропускания исходных структур на основе InGaN/GaN со спектрами пропускания структур с нанесенными на них наночастицами или пленками Au, а также сопоставление морфологии поверхности и сечения структур с нанесенными наночастицами или слоями с помощью метода атомно-силовой микроскопии (AFM). При измерении коэффициента пропускания структур InGaN/GaN с нанесенными на их внешнюю поверхность наночастицами производилось их сравнение с исходной структурой. Пропускание исходной структуры сравнивалось с пропусканием прозрачной сапфировой подложки. Оказалось, что чувствительность метода рентгеновской флуоресценции была недостаточна для обнаружения наночастиц Au вследствие незначительной интенсивности излучения линии K_α золота, по которой определяется концентрация металлической примеси. С помощью этого метода также не удалось обнаружить присутствие слоев Au, толщина которых не превышает 12 nm. Наличие наночастиц Eg в структурах InGaN/GaN было обнаружено по присутствию линий, характерных для излучения внутрицентровых $4f$ переходов Eg.

3. Экспериментальные результаты

Известно, что положение максимума (λ_{max}) спектров ФЛ в структурах с MQW на основе InGaN/GaN опреде-

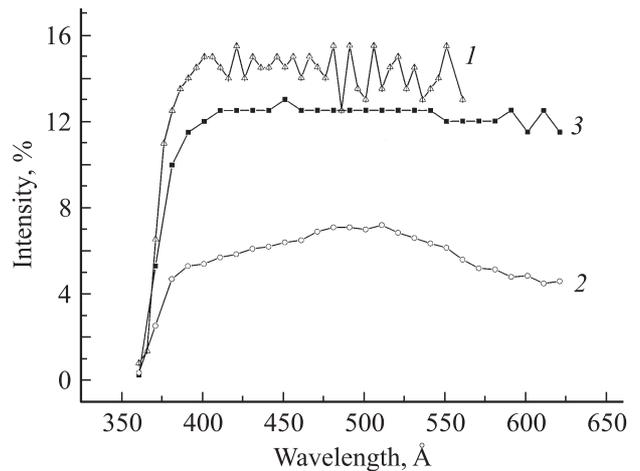


Рис. 1. Спектры пропускания структуры N1 в исходном состоянии (кривая 1), с нанесенной пленкой Au (кривая 2) и с наночастицами Au (кривая 3), измеренные при $T = 300$ К.

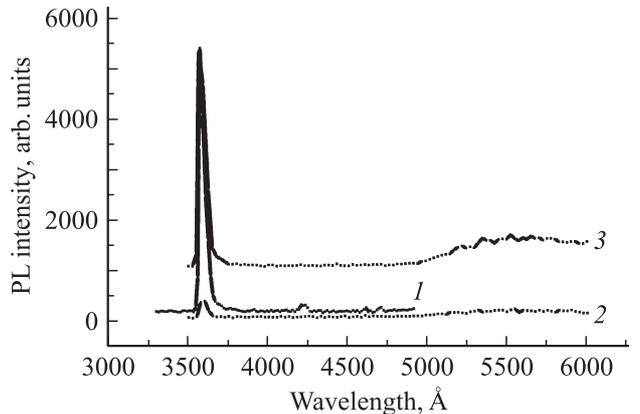


Рис. 2. Спектры ФЛ слоя n -GaN ($n = 4 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) трех образцов: исходного (кривая 1), с нанесенной пленкой (кривая 2) и с наночастицами Au (кривая 3), измеренные при $T = 77$ К и $\lambda = 325$ nm.

ляется концентрацией In [1]. Исследованные в данной работе структуры отличаются по положению λ_{max} и в соответствии с изменениями данной величины далее обозначены следующими образом: N1 ($\lambda_{\text{max}} = 442.8$ nm), N2 ($\lambda_{\text{max}} = 443.9$ nm), N3 ($\lambda_{\text{max}} = 457.0$ nm), и N4 ($\lambda_{\text{max}} = 544.0$ nm).

Спектры пропускания тонких слоев и наночастиц Au, нанесенных на поверхность структуры N1, представлены на рис. 1. Кривая 1 представляет собой спектр пропускания (СП) исходной структуры с MQW на основе InGaN/GaN, кривые 2 и 3 показывают соответствующие СП для структуры N1 с нанесенными на ее внешнюю поверхность пленкой Au и наночастицами Au. При сопоставлении спектров 1 и 3 на рис. 1 можно предположить, что уменьшение коэффициента пропускания обусловлено наличием наночастиц Au.

На рис. 2 представлены спектры ФЛ пленок n -GaN с концентрацией носителей $N_d - N_A = 4 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ для

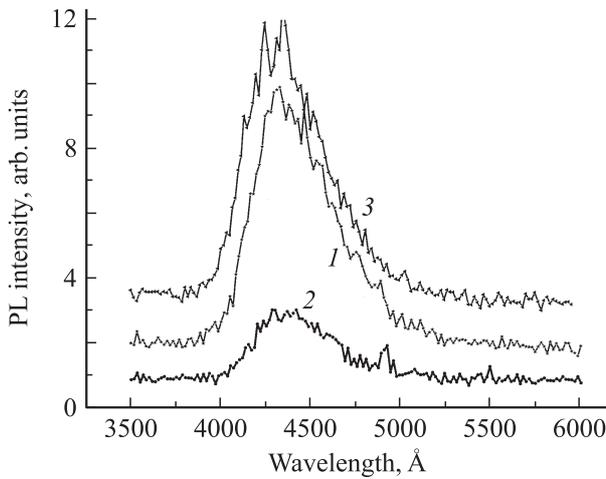


Рис. 3. Спектры ФЛ структуры *p*-GaN/*n*-GaN в исходном состоянии (кривая 1), с нанесенной пленкой Au (кривая 2) и с наночастицами Au (кривая 3), измеренные при $T = 77$ К и $\lambda = 325$ nm.

трех образцов: исходного (кривая 1) с нанесением пленки Au (кривая 2) или наночастиц (кривая 3). Из рисунка видно, что параметры спектров ФЛ, такие как интенсивность излучения (I), ширина спектральной линии на ее полувысоте (FWHM) и λ_{\max} практически не меняются после нанесения частиц Au. В то же время нанесение пленок Au приводит к уменьшению I и к увеличению FWHM (ср. кривые 1 и 2 на рис. 2). Следует отметить, что, как правило, концентрация носителей в легированном n^+ -слое структур на основе InGaN/GaN сопоставима с концентрацией носителей в исследуемом в данной работе слое *n*-GaN.

На рис. 3 показаны спектры ФЛ трех образцов со структурой *p*-GaN/*n*-GaN, отличающихся наличием нанесенных на поверхность структуры слоев Au (кривая 2) или наночастиц (кривая 3). В отличие от случая нанесения как наночастиц, так и пленок Au на слой *n*-GaN (рис. 2, кривые 3 и 2), наличие *p*-слоя в структурах *p*-GaN/*n*-GaN не привело к существенным изменениям вида спектра ФЛ: незначительно уменьшилась величина

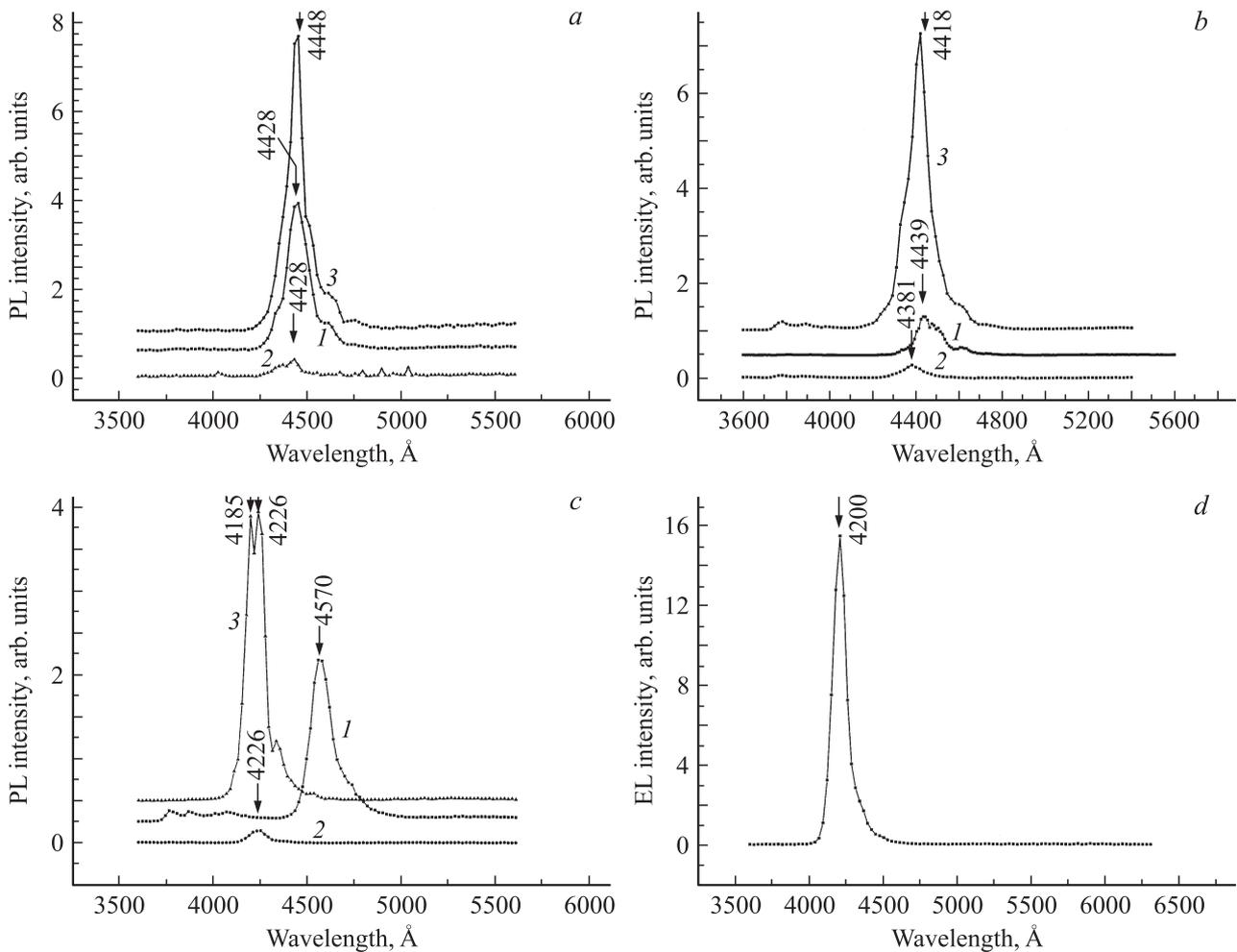


Рис. 4. Спектры ФЛ структур N1 (a), N2 (b) и N3 (c) в исходном состоянии (кривая 1), с нанесенной пленкой (кривая 2) и наночастицами Au (кривая 3), измеренные при $T = 77$ К и $\lambda = 325$ nm. На части d — спектр ЭЛ структуры N3 с нанесенными наночастицами Au, измеренный при $T = 77$ К и токе 200 мА. Вертикальными стрелками на рисунке указаны положения λ_{\max} для соответствующих спектров.

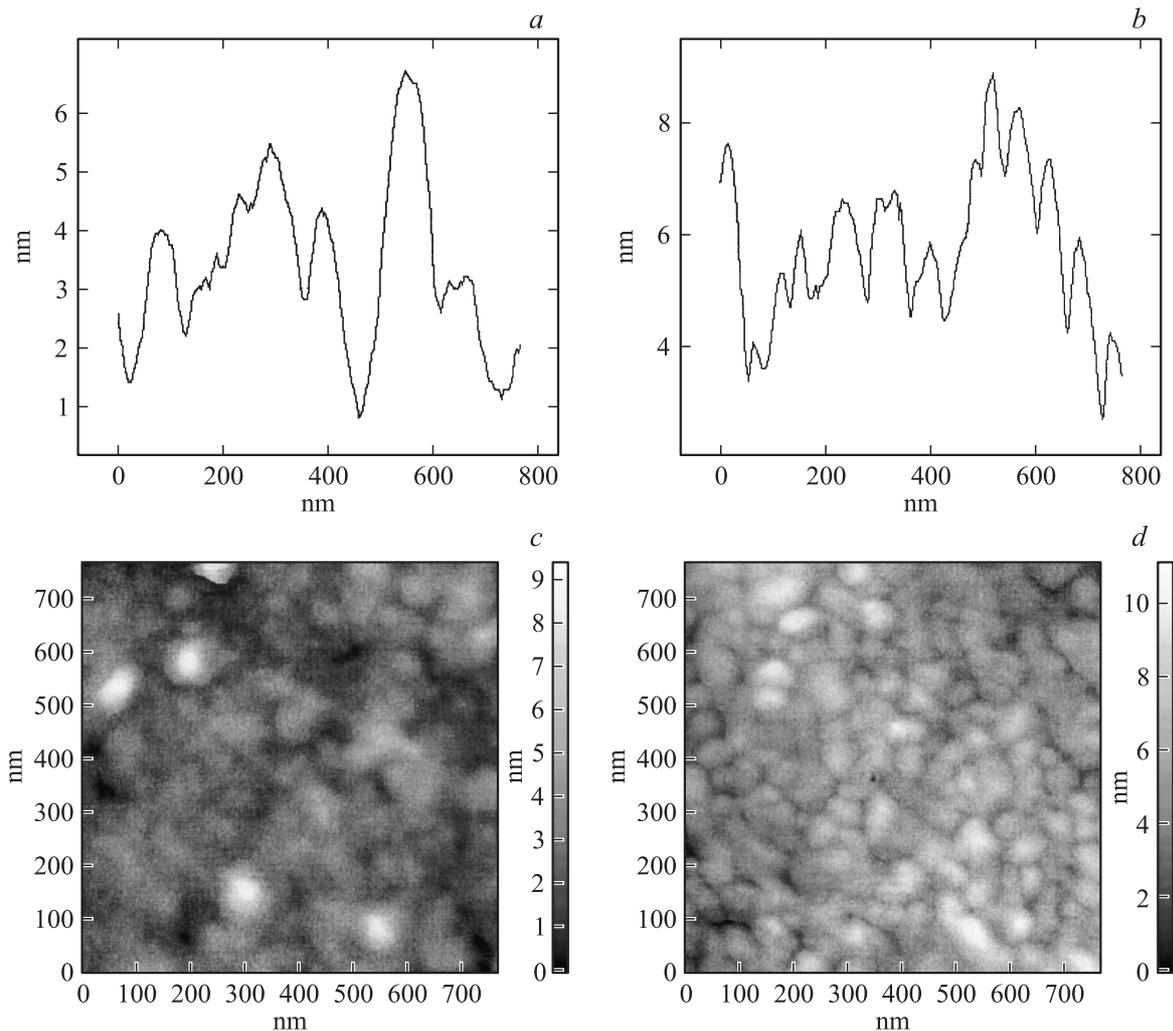


Рис. 5. Профиль сечения и морфология поверхности структуры N3 с нанесением наночастиц (*a* и *c* соответственно) или пленки Au (*b* и *d* соответственно), измеренные методом AFM.

на I , а положение λ_{\max} практически не изменилось (сравните кривые 1 и 3 на рис. 3). В то же время, как показано ниже, в структурах с MQW на основе InGaN/GaN обнаружено существенное влияние на спектры ФЛ нанесения на внешнюю поверхность структур наночастиц или слоев Au, или пленок EuqPc.

На рис. 4,*a* представлены спектры ФЛ структуры N1 ($\lambda_{\max} = 442.8$ nm), с нанесением на внешнюю поверхность пленки (кривая 2) или наночастиц Au (кривая 3). Изменений λ_{\max} не наблюдается ни в результате нанесения наночастиц, ни в результате нанесения слоев Au. Наблюдается изменение величины FWHM: в исходной структуре эта величина составляет 81 meV, при нанесении слоев Au — 91 meV, при нанесении наночастиц Au — 57 meV. Увеличение I после нанесения наночастиц Au (по сравнению с исходной структурой) составляет приблизительно 2 раза, а после нанесения пленок Au наблюдается уменьшение I .

На рис. 4,*b* представлены спектры ФЛ структуры N2 ($\lambda_{\max} = 443.9$ nm) с нанесением на внешнюю поверх-

ность структуры пленки (кривая 2) или наночастиц Au (кривая 3). В отличие от структуры N1, наблюдается сдвиг λ_{\max} (сравните кривые 1 и 3 на рис. 4,*b*) в длинноволновую область спектра на 2.1 nm после нанесения наночастиц Au, а I увеличивается в 6 раз. После нанесения пленки Au на поверхность структуры наблюдается сдвиг λ_{\max} в коротковолновую область на 5.8 nm и незначительное уменьшение I . Величины FWHM составляют 81 (кривая 1), 82 (кривая 2), 66 (кривая 3) meV.

На рис. 4,*c* представлены спектры ФЛ структуры N3 ($\lambda_{\max} = 457.0$ nm) с нанесением на внешнюю поверхность структуры пленки (кривая 2) или наночастиц Au (кривая 3). Видно, что в результате нанесения наночастиц в спектре (кривая 3) наблюдается наличие двух пиков излучения, которые сдвинуты в коротковолновую область спектра более чем на 40 nm по сравнению с λ_{\max} исходной структуры (кривая 1 на рис. 4,*c*). При этом изменение FWHM незначительно (от 89 meV в исходной структуре до 84 meV в структуре с нанесенными частицами Au), а I увеличивается в 1.6 раза.

Таким образом, положение λ_{\max} , т.е. концентрация In в структурах с MQW на основе InGaN/GaN, определяет вид спектра ФЛ, а именно I , FWHM, величину сдвига λ_{\max} ($\Delta\lambda_{\max}$).

На рис. 4, *d* приведен спектр ЭЛ структуры N3 с нанесенными частицами Au. Вид спектра ЭЛ несколько отличается от вида спектра ФЛ (сравните кривую 3 на рис. 4, *c* и спектр на рис. 4, *d*). В спектре ЭЛ имеется один пик с $\lambda_{\max} = 420$ nm, т.е. этот спектр подобен спектру ФЛ структуры N3 после введения наночастиц и, по-видимому, как и в работе [5], он соответствует излучению ямы, ближайшей к p - n -переходу. Известно [5], что вид спектров ФЛ структур с MQW на основе InGaN/GaN коррелирует с морфологией поверхности.

С помощью AFM исследовано влияние наночастиц, а также слоев Au на морфологию поверхностей исследуемых структур InGaN/GaN, при этом морфология поверхности исходной структуры была одинакова. По данным AFM можно оценить размеры частиц d в интервале $10 \text{ nm} < d < 20 \text{ nm}$, хотя имеются частицы с большими размерами. В работе [6] было показано, что усиление излучения имеет место около больших кластеров или их скоплений, в то время как уменьшение интенсивности излучения наблюдается при размерах частиц $5 < d < 10 \text{ nm}$.

Согласно данным AFM (рис. 5, *a* и *b*), влияние наночастиц Au сводится к изменению морфологии поверхности, то есть к большей дисперсии высот неоднородностей. Это приводит к увеличению интенсивности излучения структур с нанесенными на их поверхность наночастицами (по сравнению со структурами с нанесенными слоями) вследствие многократного рассеяния света этими неоднородностями. На рис. 5, *c* и *d* представлена морфология поверхности структур, профили которых показаны соответственно на рис. 5, *a* и *b*. Сравнивая рис. 5, *c* и *d*, можно сделать вывод о большей гетерогенности морфологии поверхности структуры, на которую были нанесены наночастицы Au.

На рис. 6 показаны спектры ФЛ структуры N4 с аналогичной вышеописанным структурам N1, N2 и N3 постростовой обработкой (в смысле нанесения наночастиц или пленки Au). Спектр исходной структуры N4 (кривая 1 на рис. 6) характерен для структур InGaN/GaN, λ_{\max} которых находится в „зеленой“ области спектра и имеет два пика ($\lambda_{\max} = 527.3$ и 535.4 nm). В отличие от структур N1, N2 и N3, максимум излучения которых находится в „синей“ области спектра, в спектре ФЛ структуры N4 после нанесения пленок или частиц Au появляются интенсивные полосы излучения, характерные для барьерного слоя n -GaN. Они имеют два максимума излучения при 367.3 и 389.0 nm (кривые 2 и 3 на рис. 6), что характерно для полосы излучения донорно-акцепторной рекомбинации. В то же время при нанесении наночастиц и слоев Au наблюдается существенное увеличение интенсивности излучения в зеленой области спектра и сдвиг положения λ_{\max} в коротковолновую область спектра 3 – 7 nm.

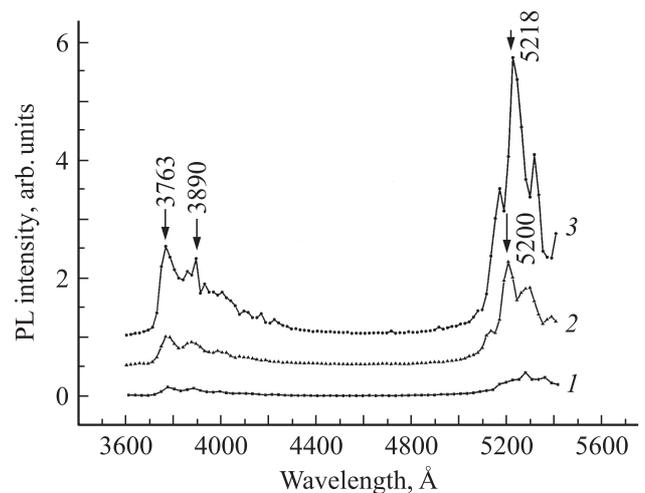


Рис. 6. Спектры ФЛ исходной (кривая 1) структуры N4 и после нанесения пленки (кривая 2) или наночастиц Au (кривая 3), измеренные при $T = 77$ K и $\lambda = 325$ nm.

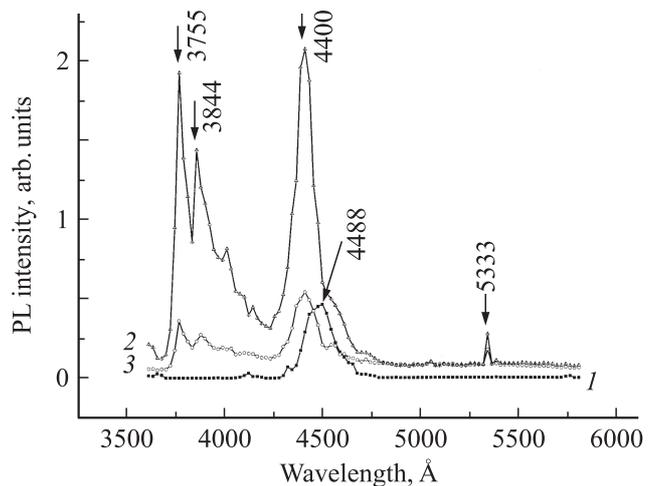


Рис. 7. Спектры ФЛ исходной структуры InGaN/GaN (кривая 1) с нанесенной тонкой пленкой EuqPc (кривая 2) и с толстой пленкой (кривая 3), измеренные при $T = 77$ K и $\lambda = 325$ nm.

В отличие от частиц и пленок Au, пленки EuqPc имеют на несколько порядков меньшую концентрацию носителей и, следовательно, меньшую величину проводимости [7]. Известно, что, как правило, фталоцианины обладают дырочным типом проводимости, дающим основание для рассмотрения другого механизма взаимодействия нанесенной органической пленки и поверхности структуры из неорганического полупроводника (диполь-дипольного механизма).

Нами также исследовано влияние толщины пленок EuqPc на спектр ФЛ структуры InGaN/GaN. На рис. 7 представлены спектры ФЛ структуры InGaN/GaN, имеющей $\lambda_{\max} = 448.8$ nm, с нанесенной тонкой ($< 0.1 \mu\text{m}$) пленкой EuqPc (кривая 2) и с толстой ($> 0.1 \mu\text{m}$) пленкой EuqPc (кривая 3). Видно, что спектры ФЛ су-

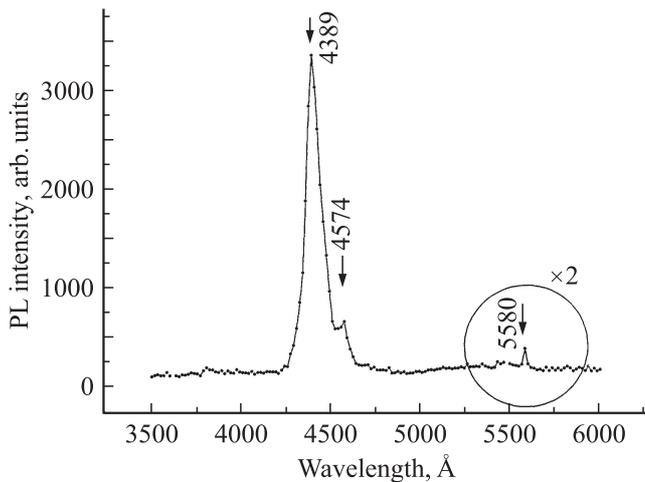


Рис. 8. Спектр ФЛ структуры InGaN/GaN с нанесенными наночастицами E6, измеренный при $T = 77$ K и $\lambda = 325$ nm.

ществено зависят от толщины пленки *EuqPc* (сравните кривые 2 и 3 на рис. 7). В случае нанесения пленки толщиной $< 0.1 \mu\text{m}$ наблюдается увеличение I в семь раз, спектр имеет полосу излучения ($\lambda_{\text{max}} = 440$ nm), характерную для структур с MQW на основе InGaN/GaN. Кроме нее в спектре наблюдаются еще два пика (при $\lambda_{\text{max}} = 375.5$ nm и 384.4 nm) с интенсивностью, сопоставимой с интенсивностью излучения с $\lambda_{\text{max}} = 440$ nm, характерные для барьерного слоя *n*-GaN (кривая 2 на рис. 7). Нанесение пленок *EuqPc* привело к изменениям вида спектров ФЛ, аналогичным изменениям спектров ФЛ структуры N4 после нанесения наночастиц Au. В „зеленой“ области спектра видна линия излучения с малой интенсивностью с $\lambda_{\text{max}} = 533$ nm, характерная для внутрицентровых $4f$ переходов Eu. Те же изменения спектров ФЛ видны и в случае нанесения толстой пленки *EuqPc* (кривая 3 на рис. 7), но интенсивность излучения значительно меньше, чем в случае тонких пленок.

Влияние полупроводниковой подложки GaAs на оптические свойства пленок фталоцианинов меди (*CuPc*) было исследовано ранее [8]. Показано, что ориентация молекулы по отношению к поверхности подложки определяется кристаллическим полем полупроводника в том случае, если толщина пленки $< 0.1 \mu\text{m}$. Таким образом, толщина пленки *CuPc*, с нанесенной на поверхность GaAs, определяет вид спектра ФЛ структуры неорганический полупроводник–органический полупроводник.

Кроме того, в настоящей работе исследовалось влияние нанесения пленок и наночастиц E6 на формирование спектров ФЛ структур InGaN/GaN. Изменение вида спектров ФЛ структур при нанесении пленок E6 аналогично изменению спектров ФЛ при легировании этих структур методом диффузии [8]. При нанесении наночастиц E6 на поверхность структуры InGaN/GaN в спектре ФЛ видна линия излучения с $\lambda_{\text{max}} = 558$ nm,

характерная для внутрицентровых $4f$ переходов E6 [9]. Интенсивность излучения этих линий мала, поскольку мала концентрация E6 (рис. 8).

4. Обсуждение результатов

Вид спектров излучения структур InGaN/GaN определяется неоднородным пространственно-энергетическим распределением неравновесных носителей, обусловленным различием пространственного распределения и типом структурных неоднородностей, эффективным электрическим полем и процессами переноса возбуждения как к излучающим состояниям, так и от них к диссипативной системе [9]. Также известно, что концентрация In определяет профили потенциального барьера между *n*-GaN и слоями InGaN, формирующими квантовые ямы [9]. Полученные в настоящей работе экспериментальные результаты позволяют заключить, что изменение величины λ_{max} в структуре с постростовой обработкой по сравнению с исходной структурой ($\Delta\lambda_{\text{max}}$), наблюдаемое в спектрах ФЛ исследованных структур после нанесения на них наночастиц или пленок Au, определяется концентрацией In. Как следует из представленных выше экспериментальных результатов, $\Delta\lambda_{\text{max}}$ принимает существенно различные значения (от единиц до десятков nm), как положительные, так и отрицательные. Кроме того, наблюдается существенное (от 2 до 6 раз) увеличение интенсивности ФЛ в структурах с нанесенными наночастицами по сравнению с исходными структурами. Для объяснения этого факта представляется целесообразным рассмотреть следующих обстоятельств.

1. Нанесение антиотражающих слоев, текстурирование поверхности и отделение исследуемой структуры от сапфировой подложки ведет к увеличению коэффициента поглощения структур [4–6].

2. Роль диполь–дипольного взаимодействия носителей заряда наночастиц благородных металлов и носителей заряда из квантовых ям. Отметим, что реализация механизма диполь–дипольного взаимодействия требует определенного пространственного расположения тонких (~ 10 nm) пленок благородных металлов по отношению к активному слою структур с MQW InGaN/GaN [6]. В то же время толщина легированного слоя *p*-GaN или *p*-AlGaN в исследованных структурах составляет примерно 100 nm вследствие необходимости обеспечения достаточной величины подвижности носителей [1]. Поэтому механизм диполь–дипольного взаимодействия в исследованных структурах представляется эффективным.

3. Взаимодействие локализованных поверхностных плазмонов с носителями, захваченными на антиотражающие поверхности. В этом случае снимаются ограничения на пространственное положение наночастиц и слоев благородных металлов по отношению к активному слою структур. Как следствие, по нашему мнению, это

обстоятельство и является определяющим для объяснения полученных в настоящей работе экспериментальных результатов.

4. Кроме того, как выяснено в настоящей работе, важную роль при взаимодействии локализованных поверхностных плазмонов с полупроводниковой структурой InGaN/GaN играют размеры наночастиц благородных металлов. Этот вывод находится в полном согласии с результатами теоретического рассмотрения проблемы влияния формы и размеров наночастиц на свойства локализованных поверхностных плазмонов [10].

5. Также можно предположить, что наночастицы Au, меняя зарядовое состояние центров безызлучательной рекомбинации, уменьшают плотность поверхностных состояний, что приводит к увеличению интенсивности излучения.

Однако в случае использованных в настоящей работе тонких пленок EuqPc механизм взаимодействия системы полупроводниковая структура–пленка может отличаться от рассмотренного выше механизма локализованных поверхностных плазмонов с носителями заряда исследованных структур. Таким образом, влияние тонких пленок EuqPc на вид спектров ФЛ обусловлено, по всей вероятности, существенным изменением профиля поверхностного потенциального барьера вследствие взаимодействия центрального иона Eu в EuqPc с центрами безызлучательной рекомбинации. Исследование влияния центрального иона Eu на вид спектров ФЛ исследуемых структур дает основание предположить, что центральный ион, играя основную роль в формировании спектров ФЛ в EuqPc , определяет механизм генерации носителей на границе раздела неорганический полупроводник–органический полупроводник.

5. Выводы

Введение наночастиц Au на поверхность исследованных структур приводит к изменению зарядового состояния центров безызлучательной рекомбинации, рождению электронно-дырочных пар, увеличению интенсивности излучения в структурах MQW на основе GaN/InGaN. Размеры наночастиц Au, существенно увеличивающие интенсивность излучения, составляют по данным исследований AFM от 10 до 20 nm. Спектры электролюминесценции структур при наличии наночастиц Au, а также нанесенных слоев Au в основном подобны спектрам фотолюминесценции, хотя и имеют дополнительный максимум излучения в коротковолновой области. Следует отметить, что использование наночастиц Au дает возможность существенного увеличения интенсивности ЭЛ структур с MQW на основе GaN/InGaN по сравнению с интенсивностью ЭЛ аналогичных структур без нанесения наночастиц. Влияние нанесения пленок EuqPc на спектры ФЛ исследованных структур InGaN/GaN аналогично влиянию легирования этих структур европием.

Авторы благодарят А.В. Зиминова за синтез EuqPc , В.В. Лундина — за предоставленные структуры

GaN/InGaN. Работа выполнена при частичной поддержке Программы Президиума РАН „Сильно коррелированные системы“.

Список литературы

- [1] В.В. Криволапчук, М.М. Мездрогина. ФТТ. **48**, 11, 2067 (2006).
- [2] J.J. Wierer, M.R. Krames, J.E. Epler, N.F. Gardner, M.G. Kraford, J.R. Wendt, J.A. Simmons, M.M. Sigals. Appl. Phys. Lett. **84**, 3885 (2004).
- [3] T. Fuhii, Y. Gao, R. Sharma, E.L. Hu, S.P. DenBarrs, S. Nakamura. Appl. Phys. Lett. **84**, 855 (2004).
- [4] K. Okamoto, I. Niki, A. Shvartzer, Y. Narukawa, T. Mukai, A. Sherer, Nature Mater. **3**, 601 (2004).
- [5] А.А. Арендоренко, Е.Г. Ермошин, Ю.Н. Свешников, И.Н. Цыпленков. Тез. докл. 6-й Всерос. конф. „Нитриды галлия, индия и алюминия. Структуры и приборы“. СПб, (2008). С. 123.
- [6] Т.В. Шубина, С.В. Иванов, А.А. Торопов, П.С. Копьев. Успехи физ. наук, **179**, 1007 (2009).
- [7] А.В. Зиминов, Т.А. Юрре, С.М. Рамш, М.М. Мездрогина. ФТТ **52**, 9, 1789 (2010).
- [8] В.Л. Берковиц, А.Б. Гордеева, Е.И. Теруков. Сб. тр. VII Междун. конф. „Аморфные и микрокристаллические полупроводники“, 179, СПб, 2010.
- [9] М.М. Мездрогина, В.В. Криволапчук, Ю.В. Кожанова. ФТП **42**, 2, 157 (2008).
- [10] V.V. Klimov, D.V. Guzатов. Phys. Rev. B **75**, 024 303 (2007).