

Влияние магнитного поля и температуры измерения на вид спектров микрофотолюминесценции в структурах с квантовыми ямами на основе InGaN/GaN, легированных Eu

© М.М. Мездрогина¹, Е.С. Москаленко¹, Ю.В. Кожанова²

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 в окончательном виде 15 декабря 2010 г.)

На основании комплексных исследований влияния напряженности магнитного поля, температуры измерения на вид спектров микрофотолюминесценции (микро-ФЛ) структур с квантовыми ямами InGaN/GaN, легированных Eu, определения зарядового состояния примесного иона Eu, изменения концентрации легирующего иона показано, что при увеличении напряженности магнитного поля (0–5 Т) в отличие от нелегированных структур наблюдается более существенное уменьшение интенсивности излучения. Увеличение температуры измерения от 4.2 до 78 К приводит к усилению эффекта влияния магнитного поля на вид спектров микро-ФЛ легированных Eu структур InGaN/GaN. Показано, что легирование Eu структур с квантовыми ямами на основе InGaN/GaN при большом уровне возбуждения приводит к сдвигу максимума излучения в длинноволновую область спектра.

Работа выполнена при поддержке гранта „Сильно коррелированные системы“ президиума РАН.

1. Введение

Светоизлучающие структуры на основе III-нитридов предполагается использовать в качестве источников белого света с целью замены ламп накаливания, люминесцентных ламп.

Известно, что основной проблемой использования светоизлучающих структур в качестве источников освещения на основе III-нитридов является падение эффективности при увеличении плотности тока для коротковолновой области спектра ($\lambda = 430\text{--}460\text{ nm}$). Интенсивные исследования структур с квантовыми ямами на основе InGaN/GaN (MQW) в течение последних лет позволили выявить основные причины падения эффективности, обусловленные малой величиной подвижности дырок, большой плотностью дефектов в барьерных слоях данных структур [1,2]. Остаются также нерешенными проблемы, связанные с созданием эффективных светоизлучающих приборов для длинноволновой области спектра ($\lambda > 520\text{ nm}$) на основе структур тройных соединений. Использование таких технологических приемов, как применение люминофоров, привело к созданию гибридных схем, в которых можно вырывать максимум длины волны излучения [3]. Известно альтернативное решение — использование легирования структур ионами редкоземельных металлов (РЗИ), которое допускает как реализацию геттерирования дефектов, уменьшение концентрации центров безызлучательной рекомбинации в слоях III-нитридов [4], так и изменение максимума длины волны излучения практически от коротковолновой (ультрафиолетовой) до длинноволновой (инфракрасной) области спектра при варьировании типа ле-

гирующего иона от Tm (УФ-область спектра) до Er (ближняя ИК-область). Введение РЗИ с незаполненной $4f$ -оболочкой, таких как Eu, которые в структурах MQW (InGaN/GaN) располагаются в барьерном слое n -GaN [1], приводит к тому, что в достаточно совершенных структурах в процессе миграции возбуждения происходит перенос неравновесных носителей на атомные уровни 5D_2 , 5D_1 иона Eu. В таких структурах обнаружено излучение, характерное для внутрицентровых $4f$ -переходов иона Eu в зарядовом состоянии $3+$ ($\lambda = 622, 691\text{ nm}$). В спектрах электролюминесценции легированных РЗИ структур в отличие от нелегированных структур не наблюдалось насыщения величины интенсивности излучения при увеличении тока [1]. Известно, что интенсивность излучения внутрицентровых $4f$ -переходов Eu определяется концентрацией оптически активных ионов, оптимальным локальным окружением иона [1,5]. Ранее было показано, что для увеличения интенсивности излучения, характерного для внутрицентровых $4f$ -переходов Eu^{3+} ($\lambda = 622\text{ nm}$), являющегося парамагнетиком, необходимая величина концентрации примеси должна быть не менее $5 \cdot 10^{18}\text{--}10^{19}\text{ cm}^{-3}$ [6]. Увеличение концентрации примеси приводит к уменьшению интенсивности излучения, характерного для $4f$ -переходов вследствие концентрационного тушения, поэтому необходимо определить оптимальную величину концентрации легирующей РЗИ-примеси для реализации максимальной интенсивности излучения внутрицентровых $4f$ -переходов.

Целью работы является исследование влияния магнитного поля температуры измерения, изменения концентрации легирующей примеси Eu на механизм мигра-

ции возбуждения носителей, вид спектров микрофотолюминесценции (микро-ФЛ) в структурах с MQW на основе InGaB/GaN, легированных Eu.

Приложение магнитного поля при измерениях спектров микро-ФЛ структур, содержащих Eu^{3+} , даст возможность детектировать механизмы изменения миграции возбуждения носителей в условиях варьирования плотности возбуждения.

2. Эксперимент

В качестве объекта исследований использовали структуры с множественными квантовыми ямами, полученные методом разложения металлорганических смесей (MOCVD). Структуры представляют собой набор из пяти квантовых ям $\text{GaN}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0 < x < 0.4$), выращенных на подложке из сапфира. Ширина квантовых ям составляет $\sim 2.0\text{--}2.5$ nm с барьером в ~ 7 nm [1,5]. В настоящей работе исследовались структуры с большой величиной интенсивности излучения, малой величиной полной ширины спектральной линии на полувысоте (FWHM), с максимумом длины волны излучения $\lambda = 410\text{--}430$ nm.

При легировании данных структур Eu использовался метод диффузии, аналогичный [4], максимальная концентрация легирующей примеси не превышала концентрацию фоновых примесей. Состав и относительная концентрация фоновых примесей определялись с помощью рентгеновской флуоресценции на установке X-Art M при $T = 300$ K.

Локальное окружение, зарядовое состояние примесного Eu определялось с помощью мессбауэровской спектроскопии на спектрометре SM 4201TERLAB при $T = 300$ K. При измерении спектров микро-ФЛ использовался лазер с $\lambda = 266$ nm, диаметром пятна $2\ \mu\text{m}$, мощностью $5\ \text{mW}$ и плотностью возбуждения $W = 8 \cdot 10^{23}$ photon \cdot s/cm². Низкий уровень возбуждения обеспечивался значением плотности $W = 3.52 \cdot 10^{22}$ photon \cdot s/cm², а высокий — величиной $3.52 \cdot 10^{23}$ photon \cdot s/cm². При измерениях спектров макро-ФЛ высокий уровень возбуждения достигался при $W = 3.52 \cdot 10^{20}$ photon \cdot s/cm².

Измерения спектра микро-ФЛ в магнитном поле проводили в геометрии Фарадея, магнитное поле создавалось сверхпроводящим соленоидом. Величину напряженности внешнего магнитного поля варьировали от 0 до 5 T, температуру измерения — от 4.2 до 78 K.

На рис. 1 представлен спектр макро-ФЛ при $T = 78$ K (возбуждение He-Cd-лазером, $\lambda = 325$ nm) для нелегированной (1) и легированной Eu структуры InGaB/GaN (2), на вставке — вид мессбауэровского спектра легированной Eu структуры. Из рис. 1 видно, что легирование структуры Eu привело к изменению вида спектра макро-ФЛ: уменьшению интенсивности излучения, сдвигу максимума длины волны излучения в длинноволновую область спектра. Из мессбауэровского спектра структуры (см. вставку к рис. 1) видно, что

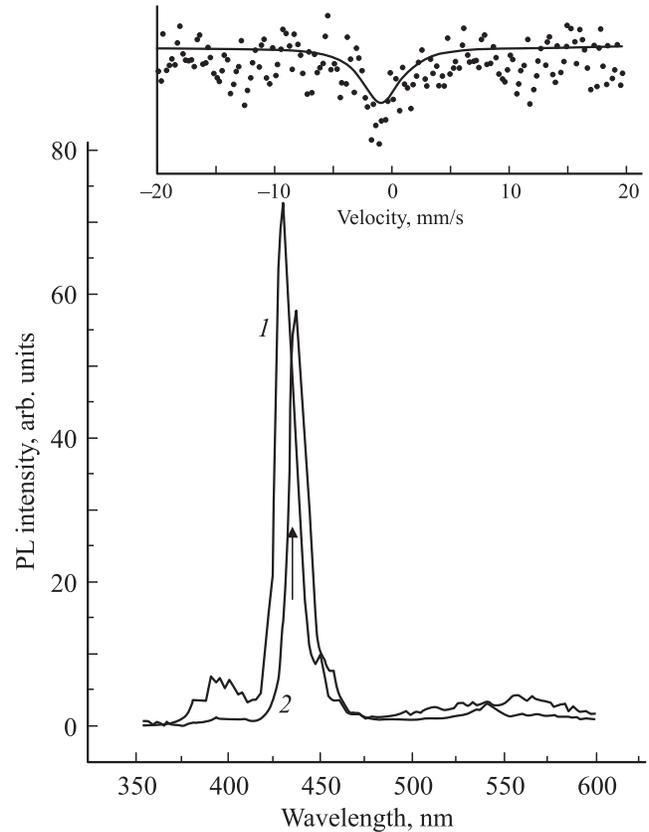


Рис. 1. Спектры макро-ФЛ нелегированной (1) и легированной Eu структуры InGaB/GaN (2). Возбуждение Ge-Cd-лазером ($\lambda = 325$ nm), $T = 78$ K. На вставке — мессбауэровский спектр легированной Eu структуры.

большая часть примеси Eu находится в зарядовом состоянии $3+$, в то же время часть примеси Eu имеет заряд $2+$.

Далее структуры обозначены следующим образом: нелегированные структуры InGaB/GaN — № 1, легированные Eu с максимальной концентрацией примеси структуры InGaB/GaN(Eu) — № 2, легированные Eu структуры с уменьшенной концентрацией¹ легирующей примеси InGaB/GaN(Eu) — № 3. Интенсивность возбуждения изменяли от $3.52 \cdot 10^{22}$ до $3.52 \cdot 10^{23}$ photon \cdot s/cm².

В работах [1,5] показано, что в структурах $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ легирующая примесь Eu располагается в слое $n\text{-GaN}$. Известно, что примесный ион Eu [7] в зарядовом состоянии Eu^{2+} в полупроводниковой матрице $n\text{-GaN}$ проявляется магнитные свойства, вид кривой и величина намагниченности зависят от величины напряженности внешнего приложенного магнитного поля. Поскольку большая часть примеси находится в зарядовом состоянии $3+$, увеличение напряженности магнитного поля должно приводить к появлению магнитного момен-

¹ В структуре № 3 уменьшение концентрации легирующей примеси Eu осуществлялось путем травления.

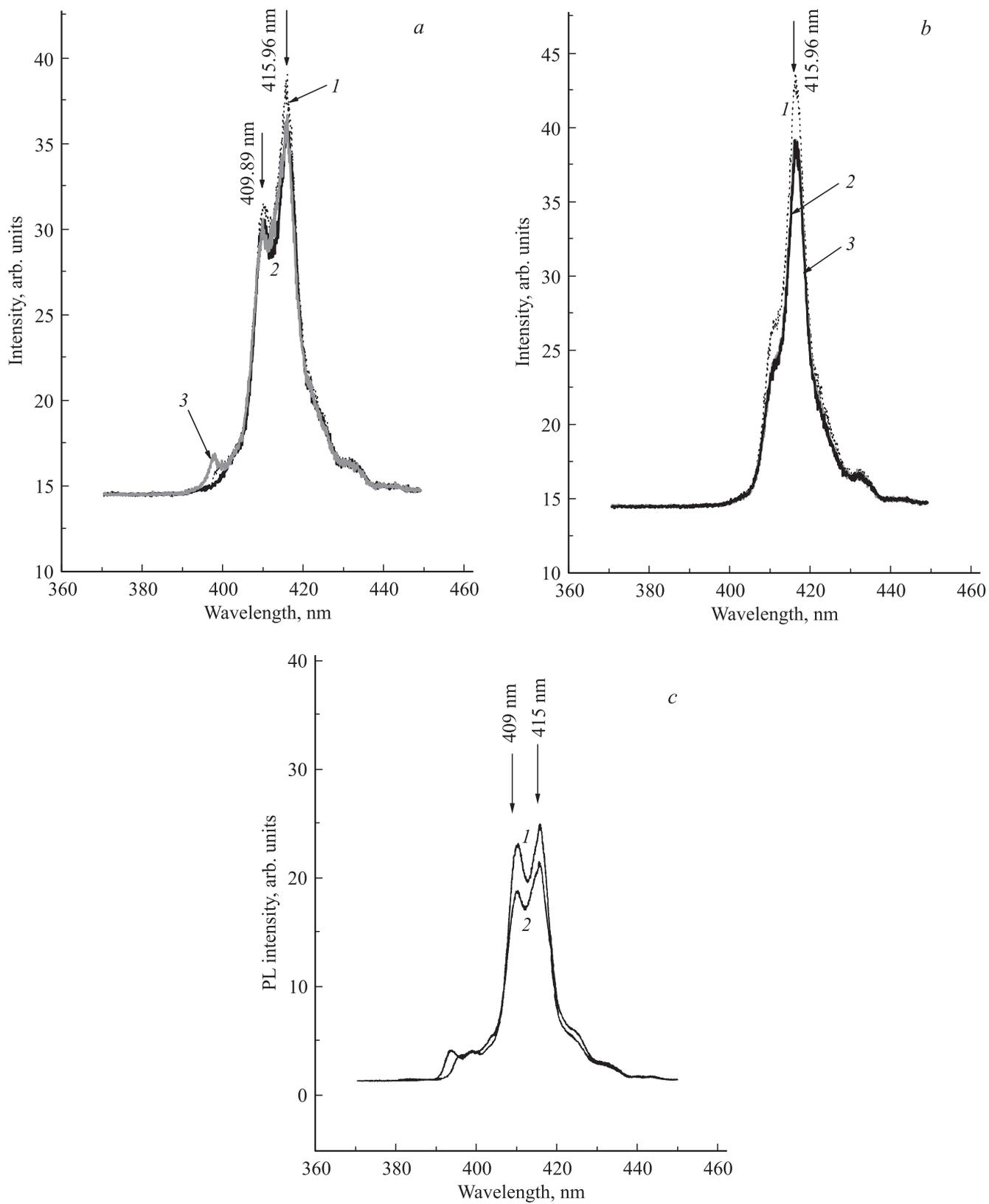


Рис. 2. Влияние напряженности магнитного поля B на вид спектра микро-ФЛ структуры № 1 при низком (a, b) и высоком (c) уровнях возбуждения и температурах 4.5 (a, c) и 78 К (b). a, b — $B = 0$ (1), 3 (2) и 5 Т (3); c — $B = 0$ (1) и 5 Т (2).

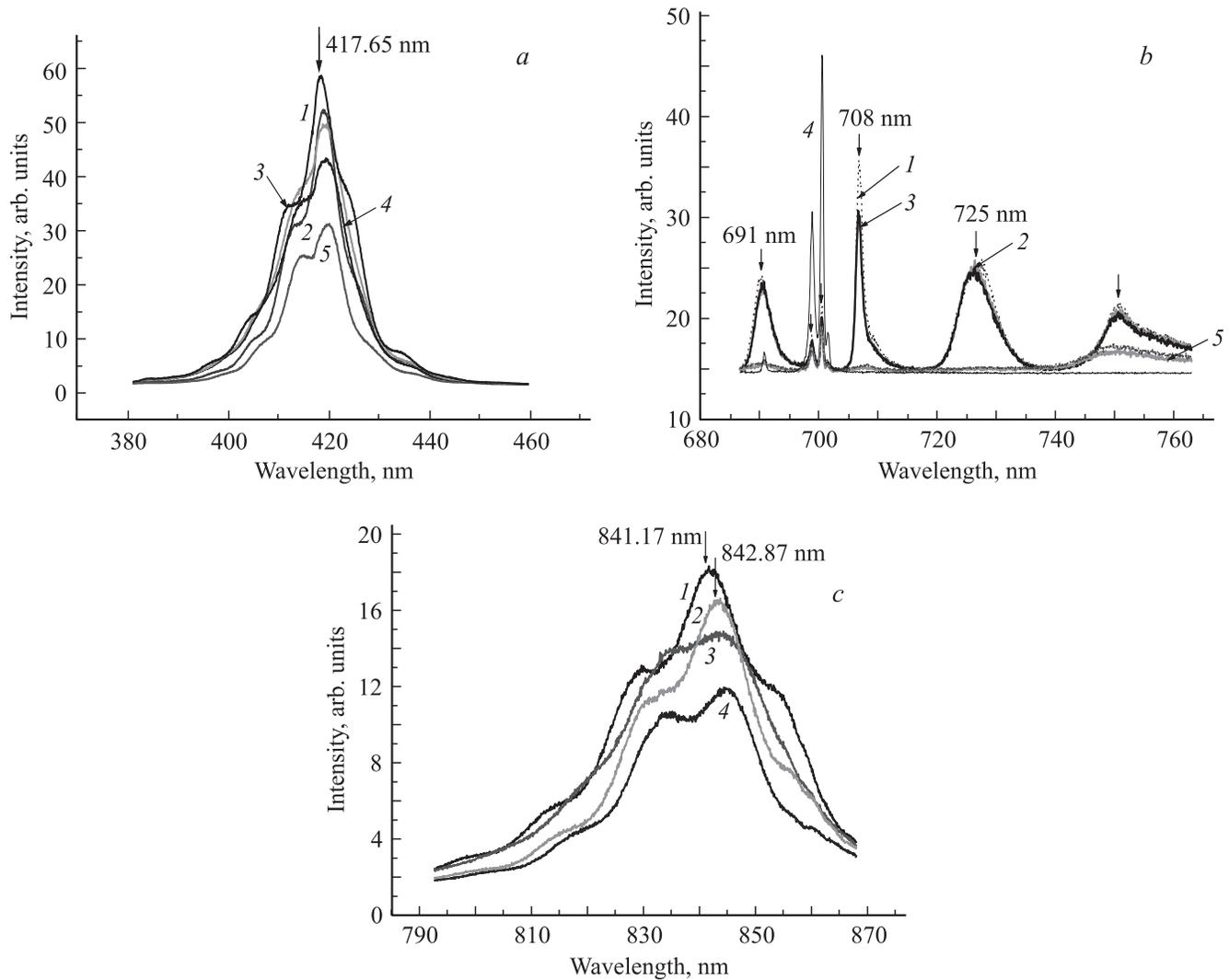


Рис. 3. Влияние напряженности магнитного поля B на вид спектра микро-ФЛ структуры № 2: на интенсивность излучения и величину FWHM (a) и только на интенсивность излучения (b, c) при высоком уровне возбуждения и температурах 4.0 и 78 К. a — в области спектра $380 < \lambda < 460$ nm. B , T и FWHM, meV: 1 — 0 и 15.7; 2 — 3 и 15.1; 3 — 5 и 15.4; 4 — 0 и 13.1; 5 — 5 и 12.1. $T = 4.0$ (1–3) и 78 К (4, 5). b — то же, что на части a , только для интенсивности излучения в области спектра $680 < \lambda < 760$ nm. B , T : 1, 4 — 0, 2 — 3, 3 — 5, 5 — 4. $T = 4.0$ (1–3) и 78 К (4, 5). c — то же, что на части b , в области спектра $790 < \lambda < 870$ nm. B , T : 1, 3 — 0, 2, 4 — 4. $T = 4.0$ (1, 2) и 78 К (3, 4).

та примеси, а следовательно, и к изменению механизма миграции носителей.

Влияние увеличения напряженности магнитного поля на вид спектра микро-ФЛ ($380 < \lambda < 460$ nm) структуры № 1 при низких уровнях возбуждения представлено на рис. 2, a, b при температурах 4.5 и 78 К. Как видно из рис. 2, a , полоса излучения состоит из двух пиков: $\lambda = 410$ nm, $\lambda = 416$ nm. Было показано, что в структурах с MQW InGaN/GaN, аналогичных по дизайну и архитектуре исследуемым в настоящей работе, пик $\lambda = 416$ nm соответствует излучению из ямы, ближайшей к p - n -переходу, а излучение с $\lambda = 410$ nm появляется вследствие наличия остальных ям [8].

При увеличении напряженности магнитного поля вид спектра микро-ФЛ структуры № 1 при $T = 4.5$ К

(рис. 2, a) не меняется. При увеличении температуры измерения до $T = 78$ К (рис. 2, b) в той же области спектра ($380 < \lambda < 460$ nm) и увеличении напряженности приложенного магнитного поля в спектре ФЛ структуры № 1 при том же низком уровне возбуждения наблюдается уменьшение интенсивности излучения пика $\lambda = 410$ nm, незначительное увеличение интенсивности излучения $\lambda = 416$ nm, при этом положение максимума, а также величина FWHM существенно не меняются. Таким образом, при низком уровне возбуждения изменения температуры измерения и магнитного поля не повлияли существенно на формирование спектра излучения структуры № 1.

На рис. 2, c представлены зависимости вида спектра микро-ФЛ структуры № 1 от изменения напряженно-

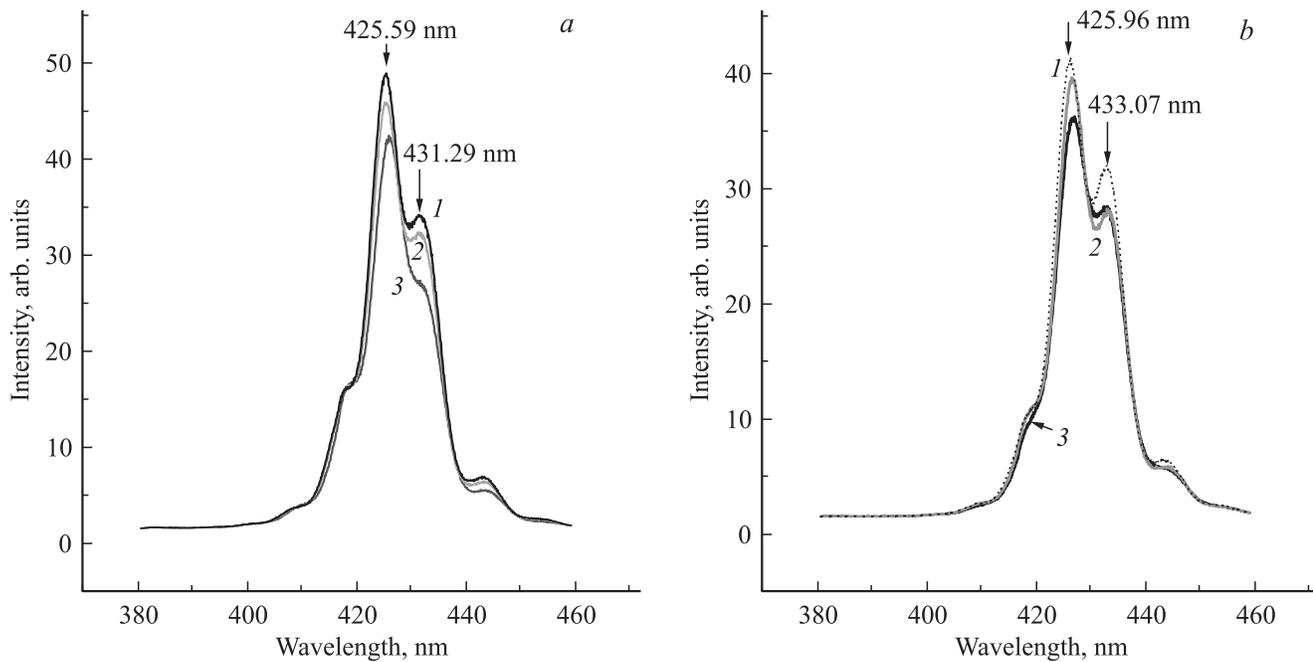


Рис. 4. Влияние напряженности магнитного поля B на вид спектра микро-ФЛ структуры № 3: интенсивность излучения и величину FWHM в области $380 < \lambda < 460$ nm при высоком уровне возбуждения и температурах 4.6 (а) и 78 К (б). B, T и FWHM, meV: а) 1 — 0 и 13.3, 2 — 3 и 13.1, 3 — 5 и 12.7; б) 1 — 0 и 13.4, 2 — 3 и 13.1, 3 — 5 и 13.6.

сти магнитного поля при высоком уровне возбуждения и температуре $T = 4.5$ К. Видно, что увеличение интенсивности возбуждения приводит к изменению вида спектра микро-ФЛ: существенному увеличению интенсивности излучения, смещению максимума излучения в длинноволновую область $\lambda = 416$ nm. Это означает, что возрастает вклад в интенсивность излучения от ямы, ближайшей к p - n -переходу, с одновременным увеличением вклада остальных ям в формирование спектра излучения. Спектр становится неоднородно уширенным с наличием двух максимумов. Увеличение величины напряженности магнитного поля от 0 до 5 Т привело к уменьшению интенсивности излучения (14%), при этом вид спектра микро-ФЛ практически не изменился.

Для структуры № 2 на рис. 3, а приведены зависимости изменения вида спектра микро-ФЛ (интенсивности излучения I и величины FWHM) при варьировании величины напряженности магнитного поля и температуры измерения при высоком уровне возбуждения. Увеличение напряженности магнитного поля до $B = 5$ Т при $T = 4.0$ К (рис. 3, а, кривые 1–3) приводит к уменьшению интенсивности излучения (на 21%). Величина FWHM при этом практически не меняется.

Увеличение температуры до $T = 78$ К и напряженности магнитного поля до 5 Т (рис. 3, а, кривые 4, 5) привело к более существенному уменьшению интенсивности излучения (34.6%) и величины FWHM. Это обстоятельство связано с тем, что примесные центры Eu играют основную роль в формировании спектра ФЛ из-за уменьшения концентрации центров излучатель-

ной рекомбинации, приводящего к уменьшению величины WFWM. При увеличении температуры измерения от 4.0 до 78 К наличие магнитного поля приводит к более существенному уменьшению интенсивности излучения, по всей вероятности также вследствие взаимодействия примесных центров, являющихся пара- и ферромагнитными, с носителями из ям.

В структуре № 2 (по сравнению со структурой № 1) наблюдается одновременно с изменениями величины интенсивности излучения незначительное увеличение максимума длины волны излучения до $\lambda = 417.65$ nm, т.е. наблюдается сдвиг максимума в длинноволновую область спектра, а интенсивность излучения полосы $\lambda = 410$ nm уменьшается. Для структуры № 2 в длинноволновой области спектра ($680 < \lambda < 760$ nm) увеличение напряженности магнитного поля при $T = 4.0$ К не приводит к изменению вида спектра микро-ФЛ (рис. 3, б, кривые 1–3), хотя спектр представляет собой четыре полосы излучения. Наиболее интенсивные из них — полосы излучения с максимумом $\lambda_{\max} = 696, 708$ nm, вероятно связанные с наличием излучения внутрицентровых $4f$ -переходов, характерных для Eu^{3+} . Предположение, сделанное в работах [1,9], о том, что в достаточно совершенных структурах с MQW на основе InGaN/GaN в процессе миграции возбуждения происходит перенос неравновесных носителей на атомные уровни $^5D_2, ^5D_0$ иона Eu, подтверждается и данными измерений микро-ФЛ на высоком уровне возбуждения.

Увеличение температуры измерения до $T = 78$ К приводит к существенному изменению вида спектра: умень-

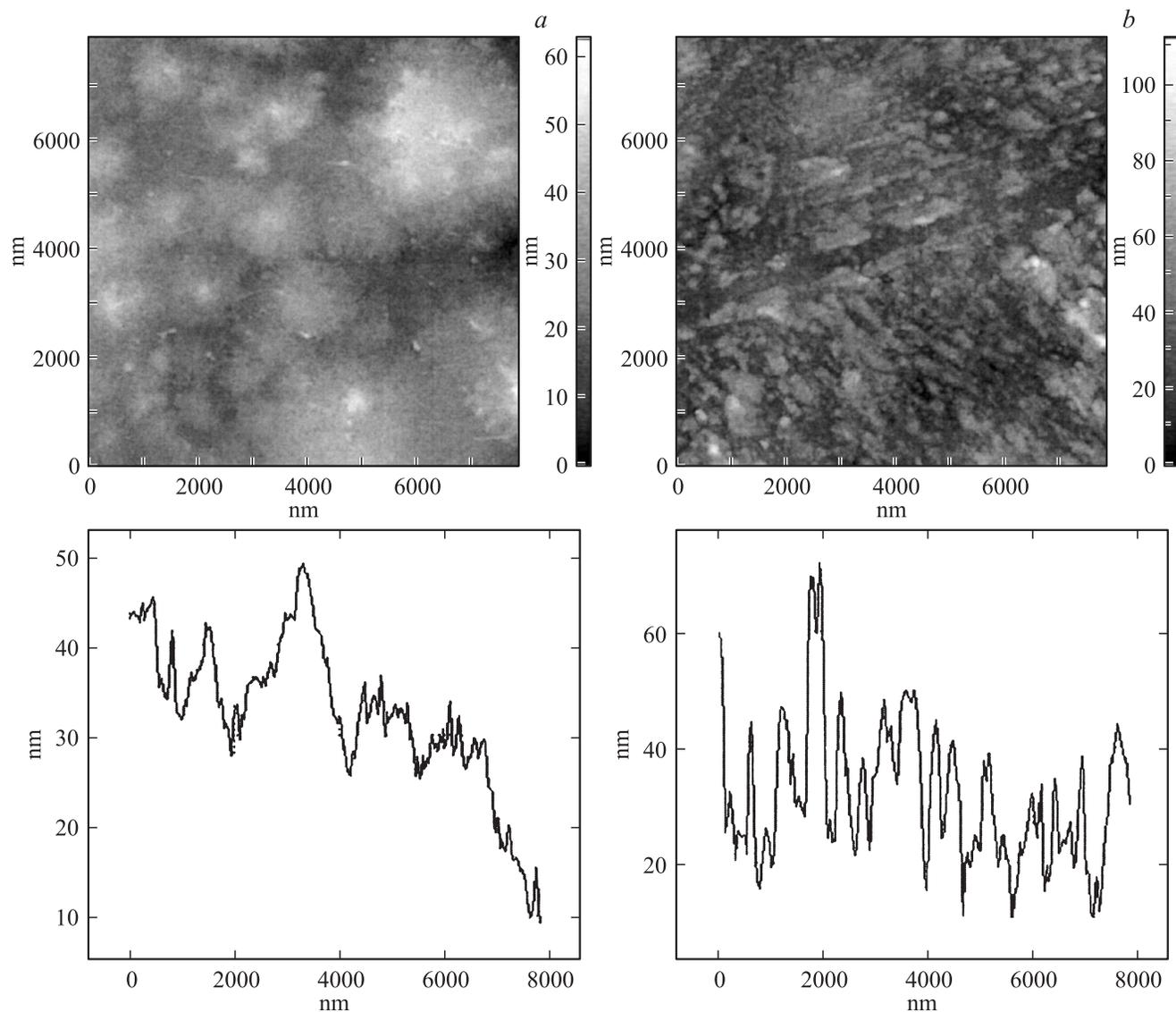


Рис. 5. Влияние легирующей примеси Eu на изменение морфологии поверхности и поперечного сечения структур по данным AFM. *a* — структура № 1, *b* — № 2, *c* — № 3.

шению интенсивности излучения вне зависимости от величины напряженности магнитного поля (рис. 3, *b*, кривые 4, 5), хотя величина интенсивности излучения незначительно увеличивается в области $720 < \lambda < 760$ nm.

В более длинноволновой области спектра ($790 < \lambda < 870$ nm) при $T = 4.0$ K (рис. 3, *c*, кривые 1, 2) спектр микро-ФЛ неоднородно уширен, увеличение напряженности магнитного поля приводит к изменению вида спектра, к уменьшению интенсивности излучения. Увеличение температуры измерения до 78 K (рис. 3, *c*, кривые 3, 4) и напряженности магнитного поля не приводит к изменению вида спектра микро-ФЛ, но приводит к уменьшению интенсивности излучения.

Таким образом, для структуры № 2 в спектре микро-ФЛ имеется интенсивное излучение в коротковолновой области спектра ($\lambda_{\max} = 417.65$ nm) и в длинноволновой области спектра $680 < \lambda < 760$ nm с веро-

ятым наличием излучения внутрицентровых $4f$ -переходов примесного иона Eu, а также излучение в области $790 < \lambda < 870$ nm, в которой интенсивность незначительно зависит от температуры измерения (4.0 или 78 K).

Спектры микро-ФЛ в коротковолновой области $380 < \lambda < 450$ nm для структуры № 3 при $T = 4.6$ K приведены на рис. 4, *a*. Для структуры № 3 увеличение напряженности магнитного поля до 5 T (рис. 4, *a*, кривая 1–3) приводит к уменьшению интенсивности излучения (14%). Максимум длины волны излучения сдвигается в длинноволновую область спектра ($\lambda = 425.59$ nm) по сравнению с длиной волны максимума излучения структуры № 1 на 10 nm (рис. 2, *a*), и одновременно появляется с меньшей интенсивностью полоса излучения с $\lambda = 431.29$ nm, величина FWHM плавно уменьшается при увеличении напряженности магнитного поля. При

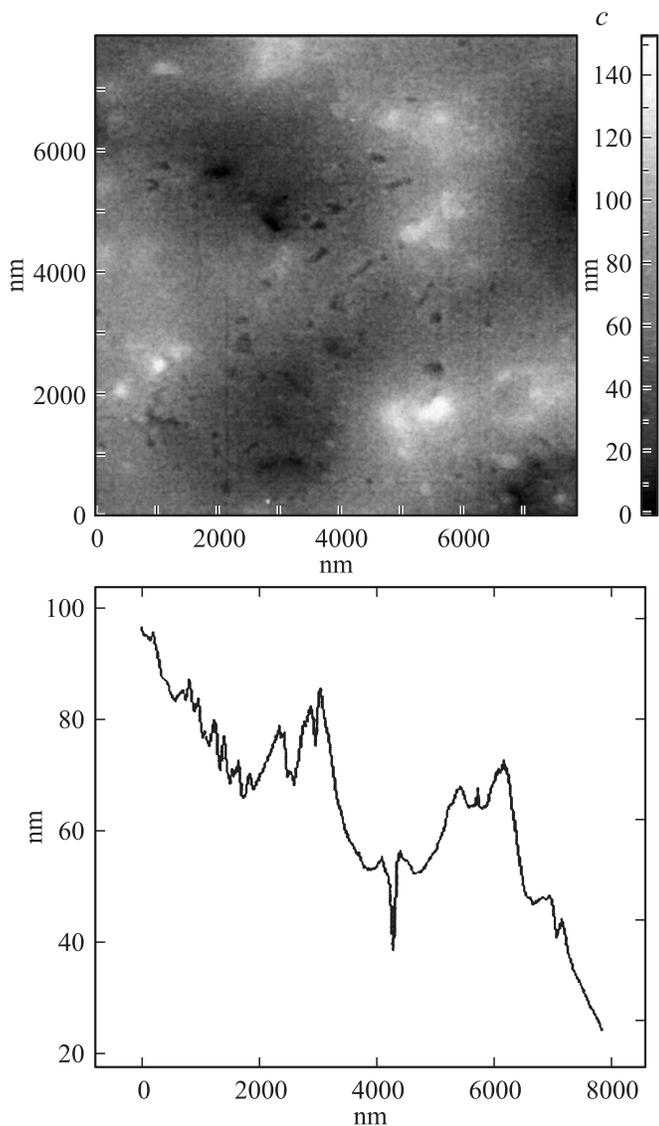


Рис. 5 (продолжение).

увеличении температуры измерения до $T = 78$ К в спектре микро-ФЛ структуры № 3 (рис. 4, *b*, кривые 1–3) наблюдается уменьшение интенсивности излучения, вид спектра микро-ФЛ при этом не меняется: величина FWHM изменяется незначительно. При увеличении температуры до 78 К наблюдается сдвиг максимумов длин волн излучения в длинноволновую область спектра ($\lambda = 425.59, 433.07$ nm), а уменьшение интенсивности излучения при увеличении напряженности магнитного поля до 5 Т составляет 10%. При увеличении температуры, изменении напряженности магнитного поля величина FWHM меняется незначительно. При сравнении с видом спектра микро-ФЛ структуры № 2 с большей концентрацией Eu (рис. 3, *a*, в той же области спектра) видно, что уменьшение концентрации Eu привело к существенному изменению вида спектра: увеличению интенсивности излучения, сдвигу λ_{\max} в длинноволновую область спектра, появлению полосы $\lambda = 433$ nm.

Влияние легирования Eu и последующей обработки (травления поверхности структур) на вид морфологии поверхности исследовалось с помощью AFM.

На рис. 5 приведены изменения вида морфологии поверхности, поперечного сечения структур № 1–3, причем геометрические размеры поля равны диаметру пятна лазера. По сравнению с видом поверхности нелегированной структуры (№ 1) в результате легирования поверхность структуры (№ 2) стала подобна поверхности столбчатой структуры — появились вытянутые в одном направлении более мелкие (по сравнению с исходной структурой № 1) кристаллы. О размерах их неоднородностей можно судить по виду поперечных сечений структур, из которых ясно, что отношения высоты к основанию практически одинаковы в структурах № 1, 3, но в то же время боковая поверхность неоднородностей структур № 2, 3 более гладкая, чем в структуре № 1. Травление приводит (структура № 3) к исчезновению более мелких неоднородностей, выявлению пирамидоподобных образований, размер которых больше, чем размер неоднородностей в структуре № 2. Можно предположить, что увеличение интенсивности излучения, сдвиг в длинноволновую область спектра микро-ФЛ структуры № 3 по сравнению с видом спектра структуры № 2 связаны в большей степени с уменьшением концентрации легирующей примеси, чем с изменением морфологии поверхности.

3. Обсуждение результатов

Полученные в настоящей работе результаты влияния магнитного поля, температуры измерения, концентрации легирующей примеси на вид спектров микро-ФЛ структур с MQW InGaN/GaN следует рассматривать с точки зрения изменения механизма возбуждения вследствие влияния всех перечисленных выше факторов. Увеличение напряженности магнитного поля и температуры измерения приводит к более существенному уменьшению интенсивности излучения в структуре № 2, чем в структуре № 1, поскольку легирование структур Eu (металлом с незаполненной $4f$ -оболочкой, зарядовым состоянием примеси $3+$) может приводить к взаимодействию носителей заряда полупроводниковой матрицы и парамагнитной примеси. Кроме того, вследствие существенно большей величины ионного радиуса Eu по сравнению со всеми остальными компонентами структур — Ga, In, N — возникают дополнительные напряжения. При значительном увеличении напряженности магнитного поля вследствие возникновения магнострикции может происходить изменение плотности локализованных состояний в запрещенной зоне. Таким образом, влияние изменения напряженности магнитного поля на вид спектров микро-ФЛ структур с квантовыми ямами на основе InGaN/GaN при наличии в полупроводниковой матрице парамагнитной (Eu^{3+}), а также магнитной примеси (в данном случае Eu^{2+} и фоновая примесь Fe) следует

рассматривать с точки зрения как изменения зонной структуры полупроводника, так и магнитострикционных явлений.

Обращает на себя внимание тот факт, что в структуре № 2 увеличение температуры измерения (при том же изменении напряженности магнитного поля от 0 до 5 Т) приводит к большему снижению интенсивности излучения микро-ФЛ по сравнению со структурой № 3, в которой меньшее изменение интенсивности излучения обусловлено меньшей концентрацией примеси, что подтверждает справедливость изложенных выше соображений.

Особое положение в длинноволновой области спектра реализуется в структуре № 2: при увеличении напряженности магнитного поля наблюдаются меньшие изменения интенсивности излучения при увеличении температуры измерения (рис. 3, *b*, кривые 4, 5), длины волн излучения $\lambda = 691, 708$ nm характерны для внутрицентровых $4f$ -переходов Eu^{3+} . Как было показано ранее в работе [5], при повышении температуры от 77 до 300 К интенсивность излучения внутрицентровых $f-f$ -переходов Eu^{3+} в кристаллах $n\text{-GaN}(\text{Eu})$ увеличивается.

4. Выводы

1) На основании результатов комплексных измерений — определения концентрации, зарядового состояния легирующей примеси — показано, что воздействие магнитного поля приводит к реализации ван-флековского парамагнетизма для Eu^{3+} .

2) Метод измерения спектров микро-ФЛ при варьировании напряженности внешнего магнитного поля и температуры измерений при введении парамагнитной и магнитной примесей дает дополнительную информацию о механизмах формирования спектров излучения в структурах с MQW на основе $\text{InGaN}/\text{GaN}(\text{Eu})$.

3) В длинноволновой области спектра в легированной Eu структуре InGaN/GaN влияние магнитного поля и температуры измерения на вид спектра микро-ФЛ меньше, чем в коротковолновой области.

4) В легирующей парамагнитной примеси Eu^{3+} имеется небольшая концентрация примеси с зарядовым состоянием Eu^{2+} , которая может быть, как и фоновая примесь Fe , магнитной примесью. Изменение напряженности внешнего магнитного поля может способствовать изменению механизма передачи возбуждения от полупроводниковой матрицы к редкоземельному иону, что в свою очередь приводит к уменьшению концентрации центров излучательной рекомбинации.

Список литературы

- [1] М.М. Мездрогина, Э.Ю. Даниловский, Р.В. Кузьмин. ФТП **44**, 3, 338 (2010).
- [2] Н.И. Бочкарева, В.В. Вороненков, Р.И. Горбунов, А.С. Зубрилов, Ю.С. Леликов, Ф.Е. Латышев, Ю.Т. Ребане, А.И. Цюк, Ю. Г. Шретер. ФТП **44**, 6, 822 (2010).

- [3] Н.А. Гальчина, Л.М. Коган, Н.П. Социн, С.С. Широков, А.Э. Юнович. ФТП **41**, 9, 1143 (2007).
- [4] В.В. Криволапчук, М.М. Мездрогина, А.В. Насонов, С.Н. Родин. ФТТ **45**, 9, 1558 (2003).
- [5] М.М. Мездрогина, В.В. Криволапчук, Ю.В. Кожанова. ФТП **42**, 2, 157 (2008).
- [6] В.Ф. Мастерков, Ф.С. Насрединов, П.П. Серегин, Е.И. Теруков, М.М. Мездрогина. ФТП **32**, 6, 702 (1998).
- [7] J.U. Hite, G.T. Thaler, R. Khanna, C.R. Abemany, S.J. Pearton, J.H. Park, A.J. Steckl, J. Zavada. Appl. Phys. Lett. **89**, 132 119 (2006); M. Pan, A.J. Steckl. Appl. Phys. Lett. **83**, 1, 9 (2003).
- [8] 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.
- [9] В.В. Криволапчук, М.М. Мездрогина, Э.Ю. Даниловский, Р.В. Кузьмин. ФТТ **51**, 2, 365 (2009).