

09

Влияние напряженности магнитного поля и интенсивности возбуждения на вид спектров микрофотолюминесценции структур с квантовыми ямами на основе GaN/InGaN, легированных Sm, Eu + Sm

© М.М. Мездрогина¹, Е.С. Москаленко¹, Н.К. Полетаев¹, 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 24 апреля 2012 г.

В окончательной редакции 2 октября 2012 г.)

На основании результатов комплексных измерений спектров микрофотолюминесценции структур с квантовыми ямами на основе InGaN/GaN(Sm), определения концентрации и зарядового состояния легирующей примеси Sm показано, что увеличение напряженности магнитного поля и интенсивности возбуждения спектров микрофотолюминесценции приводят к увеличению интенсивности излучения и сдвигу максимума излучения в коротковолновую область спектра. Измерения спектров микрофотолюминесценции при варьировании напряженности внешнего магнитного поля и введении парамагнитной и магнитной примесей дают дополнительную информацию о механизмах формирования спектров излучения в структурах с квантовыми ямами InGaN/GaN(Sm), (Eu + Sm). В длинноволновой области спектра в легированных Sm, Sm + Eu структурах InGaN/GaN влияние магнитного поля на вид спектров микрофотолюминесценции меньше, чем в коротковолновой области.

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

1. Введение

Светоизлучающие структуры на основе III-нитридов, которые предполагается использовать в качестве источников белого света, позволяют решить проблему малоэнергетического твердотельного освещения и отказаться от ламп накаливания и люминесцентных ламп.

В то же время падение эффективности при увеличении плотности тока $I > 30 \text{ A/cm}^2$ для коротковолновой области спектра ($\lambda = 420\text{--}460 \text{ nm}$) является существенным недостатком при использовании таких светоизлучающих структур в качестве источников освещения. Падение эффективности обусловлено рядом механизмов: утечкой электронов в p -область структуры, флуктуацией состава InGaN в активных областях, а также большой плотностью дефектов в барьерных слоях данных структур [1–3]. Остаются также нерешенными проблемы, связанные с созданием эффективных светоизлучающих приборов на основе соединений III-нитридов для длинноволновой области спектра ($\lambda > 520 \text{ nm}$). Создание гибридных схем с применением люминофоров обеспечивает возможность изменения максимума длины волны излучения, но требует введения дополнительных технологических операций при создании светодиодов (LED).

Известно альтернативное решение: использование легирования структур на основе III-нитридов ионами редкоземельных металлов (РЗМ), что позволяет как геттерировать дефекты в барьерном слое, уменьшать

концентрацию центров безызлучательной рекомбинации в слоях III-нитридов [4], так и изменить максимум длины волны излучения практически от коротковолновой (ультрафиолетовой) до длинноволновой (инфракрасной) области спектра при варьировании типа легирующего иона: от Tm (УФ-область спектра) до Er (ближняя ИК-область). Легирование кристаллов GaN примесью Eu [5] позволило создать LED для длинноволновой области спектра ($\lambda = 622 \text{ nm}$). Подобного рода решение при одновременном легировании тремя РЗМ (Tm, Er, Eu) другого широкозонного полупроводника ZnO привело к созданию светодиодов белого света [6].

Введение РЗМ с незаполненной $4f$ -оболочкой, таких как Eu, Sm, которые располагаются в структурах MQW (InGaN/GaN) 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^{3+} и на атомные уровни $^4G_{5/2}$ – $^6H_{11/2}$ иона Sm^{3+} . В таких структурах обнаружены линии излучения, характерные для внутрицентровых f – f -переходов иона Eu в зарядовом состоянии $3+$ ($\lambda = 622, 691 \text{ nm}$) и Sm в зарядовом состоянии $3+$ ($\lambda = 714 \text{ nm}$). В спектрах электролюминесценции легированных РЗМ структур не наблюдалось насыщения величины интенсивности излучения при увеличении тока [7]. Ранее было показано, что для увеличения интенсивности излучения, характерного для внутрицентровых f – f -переходов Eu^{3+} ($\lambda = 622 \text{ nm}$)

и Sm^{3+} ($\lambda = 714 \text{ nm}$), являющихся парамагнетиками, необходимая величина концентрации примеси должна быть не менее $5 \cdot 10^{18} - 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ [4]. Увеличение концентрации примеси приводит к уменьшению интенсивности излучения, характерного для $f-f$ -переходов, вследствие концентрационного тушения.

Целью настоящей работы является исследование влияния магнитного поля и интенсивности возбуждения на механизм миграции возбуждения носителей и вид спектров микрофотолуминесценции (микро-ФЛ) в структурах с MQW на основе InGaN/GaN, легированных Sm, Eu + Sm.

Увеличение напряженности магнитного поля и интенсивности возбуждения при измерениях спектров микро-ФЛ структур, содержащих Sm, а также Eu + Sm, даст возможность детектировать механизмы изменения миграции возбуждения носителей в условиях повышенной плотности возбуждения, что позволит оценить влияние постростовой обработки (последовательности и температуры отжига) на эффективность легирования двумя примесями (Eu + Sm), а также расширить функциональные возможности исследуемых структур.

2. Эксперимент

В качестве объекта исследований были использованы структуры с MQW, полученные методом MOCVD, представляющие собой набор из пяти квантовых ям GaN/In_xGa_{1-x}N ($0.1 < x < 0.4$), выращенных на подложке из сапфира. Ширина квантовых ям составляет $\sim 2.0 - 2.5 \text{ nm}$ с барьером в $\sim 7 \text{ nm}$ [8]. В настоящей работе исследовались структуры с большой величиной интенсивности излучения, малой величиной полной ширины спектральной линии на полувысоте (FWHM) и максимумом длины волны излучения $\lambda = 420 - 440 \text{ nm}$. При легировании структур Sm, Eu + Sm использовался метод диффузии [7], максимальная концентрация Sm, Eu + Sm не превышала концентрацию фоновых примесей. Состав и относительная концентрация легирующей и фоновых примесей определялись с помощью рентгеновской флуоресценции на установке X-Apt M при $T = 295 \text{ K}$.

Локальное окружение и зарядовое состояние примесных Sm, Eu определялись с помощью мессбауэровской спектроскопии на спектрометре SM 4201TERLAB при $T = 295 \text{ K}$. Sm в исследованных структурах находился в зарядовом состоянии Sm^{3+} в отличие от ранее исследованного Eu, зарядовое состояние которого по данным мессбауэровской спектроскопии в основном было Eu^{3+} , но часть примеси Eu имела зарядовое состояние Eu^{2+} .

При измерении спектров микро-ФЛ использовался лазер с $\lambda = 266 \text{ nm}$, размер пятна $2 \mu\text{m}$, мощность 5 mW . Плотность при высоком уровне возбуждения составляла $W = 3.52 \cdot 10^{23} \text{ photon} \cdot \text{s}/\text{cm}^2$, при низком уровне она была на порядок меньше. При измерении спектров макро-ФЛ в качестве высокой использовалась плотность возбуждения $3.52 \cdot 10^{20} \text{ photon} \cdot \text{s}/\text{cm}^2$.

Измерения спектра микро-ФЛ в магнитном поле проводились в геометрии Фарадея, магнитное поле создавалось сверхпроводящим соленоидом. Величина напряженности внешнего магнитного поля варьировалась в интервале от 0 до 5 Т, температура измерения 4.6 К.

Далее структуры обозначены следующим образом: легированные Sm структуры InGaN/GaN — № 1; легированные Eu + Sm с равными концентрациями примесей, при одинаковых постростовых режимах отжига структуры InGaN/GaN(Eu + Sm) — № 2; структуры InGaN/GaN(Eu + Sm) с различными концентрациями примесей Eu и Sm — № 3. Интенсивность возбуждения от низкого уровня до высокого изменялась на один порядок величины только для структуры № 1.

На рис. 1, *a* представлен спектр макро-ФЛ структуры № 1 при $T = 77 \text{ K}$ (возбуждение He-Cd-лазером,

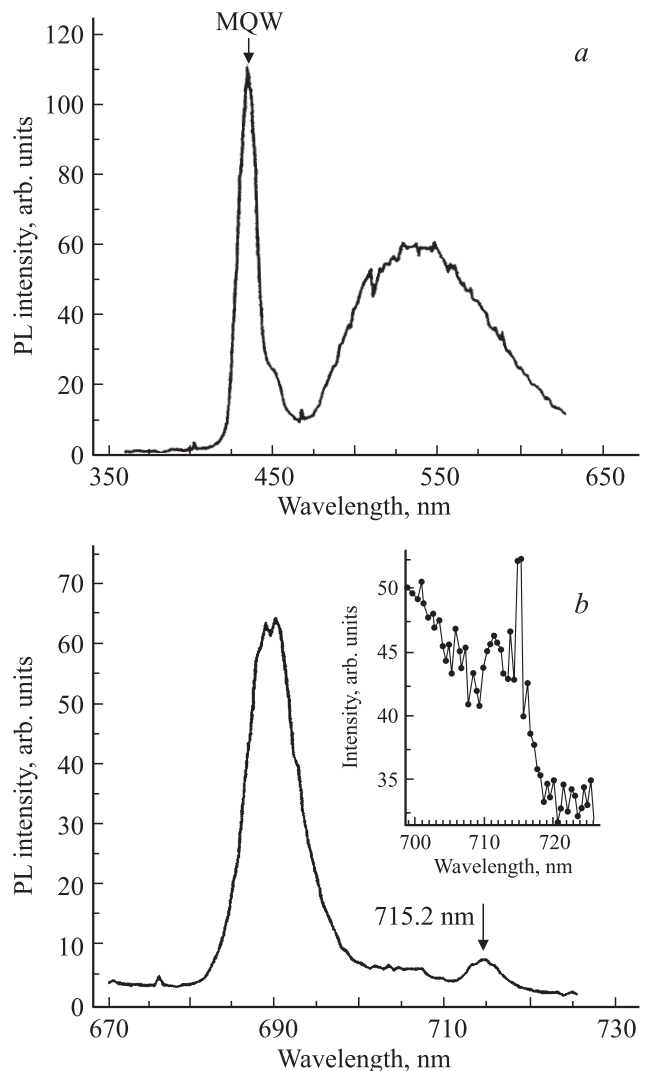


Рис. 1. Спектр макро-ФЛ структуры InGaN/GaN(Sm) (№ 1), $T = 77 \text{ K}$, возбуждение He-Cd-лазером ($\lambda = 325 \text{ nm}$, диаметр пятна 3 mm). *a* — спектр в коротковолновой области, $\lambda_{\text{max}} = 436.4 \text{ nm}$; *b* — спектр в длинноволновой области. На вставке в увеличенном вертикальном масштабе показана область спектра в интервале $700 - 720 \text{ nm}$.

$\lambda = 325$ nm, площадь пятна 3 mm) в коротковолновой области спектра с характерной для излучения из квантовых ям полосой с $\lambda_{\max} = 436.4$ nm. На рис. 1, *b* приведен спектр ФЛ для длинноволновой области спектра, на вставке показан участок спектра вблизи положения излучения внутрицентрового перехода Sm^{3+} (715.2 nm). В работе [4] было показано, что легированные структуры InGaN/GaN, имеющие большую интенсивность излучения и малую величину FWHM ($28 < \text{FWHM} < 32$ meV), как правило, характеризуются малыми величинами интенсивности излучения в длинноволновой желто-зеленой ($500 < \lambda < 600$ nm) области спектра. Структура № 1, исследуемая в настоящей работе, имеет интенсивную полосу излучения в этой области, что связано с влиянием легирования РЗМ на формирование спектров макро-ФЛ. В длинноволновой области спектра ($680 < \lambda < 720$ nm) имеется полоса излучения с $\lambda_{\max} = 688.5$ nm, что можно связать с рекомбинацией типа глубокий донор–мелкий акцептор. Излучение с $\lambda_{\max} = 715.2$ nm, имеющее незначительную интенсивность, соответствует внутрицентровым $4f$ -переходам Sm: ${}^4G_{5/2} - {}^6H_{11/2}$ (вставка на рис. 1, *b*).

Ранее было показано, что пространственное расположение легирующих примесей РЗМ находится в барьерном GaN-слое структур с MQW на основе InGaN/GaN [5]. Как правило, интенсивность излучения с $\lambda_{\max} = 715.2$ nm, соответствующего внутрицентровым $4f$ -переходам Sm, значительно больше в слоях GaN, выращенных MOCVD [6], чем в слоях, полученных методом хлорид-гидридного эпитаксиального роста (HVPE), с большей концентрацией дефектов. Таким образом, редкоземельный ион (РЗИ) можно рассматривать как оптический зонд, характеризующий совершенство структуры, в частности барьерного слоя GaN.

В мессбауэровском спектре (неоднородно уширенном), как правило, имеется один максимум, соответствующий зарядовому состоянию Sm^{3+} , симметрия локального окружения близка к тетраэдрической. Увеличение напряженности магнитного поля может приводить к появлению магнитного момента примеси, а следовательно, и к изменению механизма миграции носителей.

Было установлено, что изменение напряженности магнитного поля в интервале $0 < B < 5$ Т не оказывает влияния на вид спектров макро-ФЛ исследуемых структур № 1–3.

Влияние увеличения напряженности магнитного поля при низком уровне интенсивности возбуждения ($W = 10^{22}$ photon · s/cm²) на вид спектра микро-ФЛ ($380 < \lambda < 460$ nm) легированной Sm структуры InGaN/GaN(Sm) > (№ 1) представлено на рис. 2 при $T = 4.6$ К. Как видно из рис. 2 (кривая 1) спектр фотолюминесценции структуры № 1 в отсутствие магнитного поля состоит из двух полос излучения с пиками различной интенсивности: $\lambda_1 = 432$ nm и $\lambda_2 = 441.6$ nm. Таким образом, по сравнению со спектром макро-ФЛ в спектре микро-ФЛ при увеличении напряженности магнитного поля имеют место сдвиг в коротковолновую область

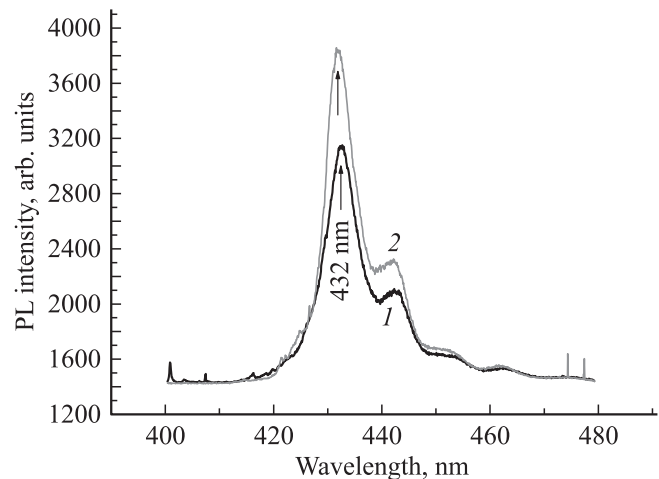


Рис. 2. Влияние увеличения напряженности магнитного поля при низком уровне интенсивности возбуждения ($W = 10^{22}$ photon · s/cm²) на вид спектра микро-ФЛ ($380 < \lambda < 460$ nm) структуры InGaN/GaN(Sm) (№ 1) при $T = 4.6$ К. В, Т: 1 — 0, 2 — 5.

спектра на 4.4 nm и появление второго пика излучения с $\lambda_2 = 441.6$ nm. Было показано, что в структурах с MQW на основе InGaN/GaN, аналогичных по дизайну и архитектуре структурам, исследуемым в настоящей работе, пик $\lambda = 432$ nm соответствует излучению из ямы, ближайшей к p - n -переходу, а пик излучения с $\lambda = 441.6$ nm в спектре микро-ФЛ присутствует вследствие наличия остальных ям [8]. В структуре № 1 не наблюдается изменения положения λ_{\max} при варьировании напряженности магнитного поля ($0 < B < 5$ Т). В то же время величина интенсивности излучения возрастает при увеличении напряженности магнитного поля до $B = 5$ Т, а величина FWHM меняется незначительно. Таким образом, при данном уровне возбуждения и температуре измерения $T = 4.6$ К изменение напряженности магнитного поля привело к увеличению интенсивности в спектре микро-ФЛ структуры № 1.

На рис. 3 представлены спектры микро-ФЛ той же структуры — InGaN/GaN(Sm) (№ 1) — при большем уровне интенсивности возбуждения ($W = 0.7 \cdot 10^{23}$ photon · s/cm²) и том же, что на рис. 2, изменении напряженности магнитного поля ($0 < B < 5$ Т), $T = 4.6$ К. Видно, что увеличение интенсивности возбуждения приводит к значительному изменению вида спектра микро-ФЛ: существенному увеличению интенсивности излучения, изменению положения λ_{\max} ($\lambda_1 = 425$ nm и $\lambda_2 = 430$ nm, с практически равными интенсивностями излучения). По сравнению со спектром микро-ФЛ при меньшем уровне возбуждения (рис. 2) имеет место еще больший сдвиг излучения в коротковолновую область.

Таким образом, при увеличении интенсивности возбуждения формирование спектра микро-ФЛ, положение линий, увеличение интенсивности излучения определяются не только вкладом ямы, ближайшей к p - n -переходу, но и вкладом остальных ям. Спектр микро-ФЛ

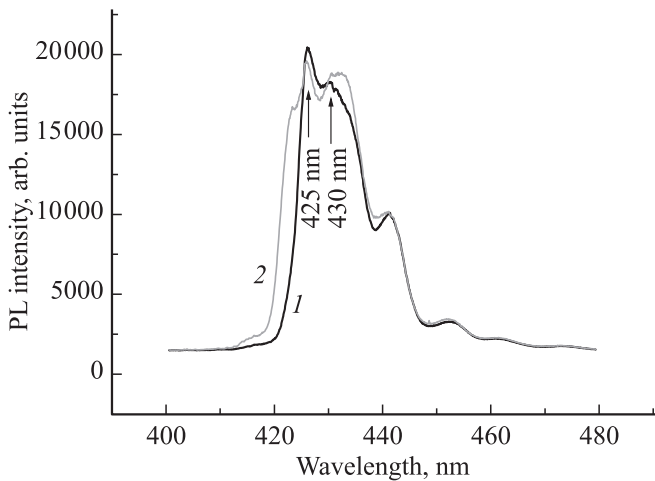


Рис. 3. Влияние увеличения напряженности магнитного поля при большем уровне возбуждения ($W = 0.7 \cdot 10^{23}$ photon \cdot s/cm 2), чем на рис. 2, на вид спектра микро-ФЛ структуры InGaN/GaN<Sm> (№ 1) при $T = 4.6$ К. В, Т: 1 — 0, 2 — 5.

становится неоднородно уширенным и характеризуется двумя пиками с практически одинаковой интенсивностью излучения. Увеличение интенсивности возбуждения и величины напряженности магнитного поля от 0 до 5 Т не приводит к уменьшению интенсивности излучения, которое наблюдалось в случае структур, легированных Eu [4]. При сравнении вида спектров микро-ФЛ (рис. 2 и 3) при разных уровнях возбуждения, но при одинаком изменении напряженности магнитного поля (от 0 до 5 Т) и одинаковой температуре измерений ($T = 4.6$ К) видно, что увеличение интенсивности возбуждения приводит также к большему значению величины FWHM: 54 (рис. 2) и 107 meV (рис. 3).

Из спектра рентгеновской флуоресценции структуры № 1 (InGaN/GaN<Sm>) по линии K_{α} примеси Sm была оценена ее концентрация, которая оказалась равной $2 \cdot 10^{18}$ cm $^{-3}$.

Для легированной Eu + Sm (концентрации РЗИ примесей равны) структуры № 2 (InGaN/GaN<Eu + Sm>) на рис. 4 показаны изменения вида спектра микро-ФЛ (интенсивности излучения и величины FWHM) при варьировании напряженности магнитного поля при уровне возбуждения, равном $W = 10^{22}$ photon \cdot s/cm 2 . Увеличение напряженности магнитного поля до $B = 5$ Т при $T = 4.6$ К (рис. 4, кривая 2) приводит к некоторому увеличению интенсивности излучения. Величина FWHM возрастает, меняется положение максимума излучения по сравнению с положением λ_{\max} для структуры № 1 (рис. 2): λ_{\max} сдвигается в длинноволновую область, спектр становится неоднородно уширенным с тремя максимумами излучения ($\lambda_1 = 434$ nm, $\lambda_2 = 442$ nm, $\lambda_3 = 459$ nm). Интенсивность излучения меняется несущественно, что видно из сравнения кривых 1 и 2 на рис. 4 при тех же изменениях величины напряженности магнитного поля (от 0 до 5 Т).

В длинноволновой области спектра увеличение напряженности магнитного поля приводит к незначительному уменьшению интенсивности излучения линий $\lambda_1 = 754$ nm, $\lambda_2 = 776$ nm, $\lambda_3 = 798$ nm (кривые 1 и 2 рис. 5).

Спектры микро-ФЛ ($380 < \lambda < 450$ nm) структуры № 3 (InGaN/GaN<Eu + Sm>) при ($0 < B < 5$ Т), $T = 4.6$ К приведены на рис. 6. Структура № 3 отличалась от структуры № 2 тем, что концентрация Eu была больше концентрации Sm, а суммарная концентрация примесей превышала $5 \cdot 10^{18}$ cm $^{-3}$.

Для структуры № 3 увеличение напряженности магнитного поля до 5 Т (рис. 6, кривая 2) приводит к незначительному уменьшению интенсивности излучения (5%). Максимум длины волны излучения по сравнению с положением аналогичного максимума для струк-

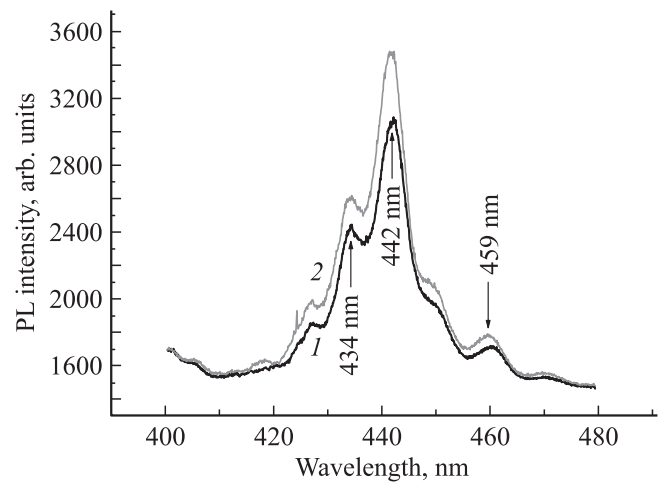


Рис. 4. Изменение вида спектра микро-ФЛ структуры InGaN/GaN<Eu + Sm> (№ 2) при варьировании величины напряженности магнитного поля при уровне возбуждения $W = 10^{22}$ photon \cdot s/cm 2 при $T = 4.6$ К. В, Т: 1 — 0, 2 — 5.

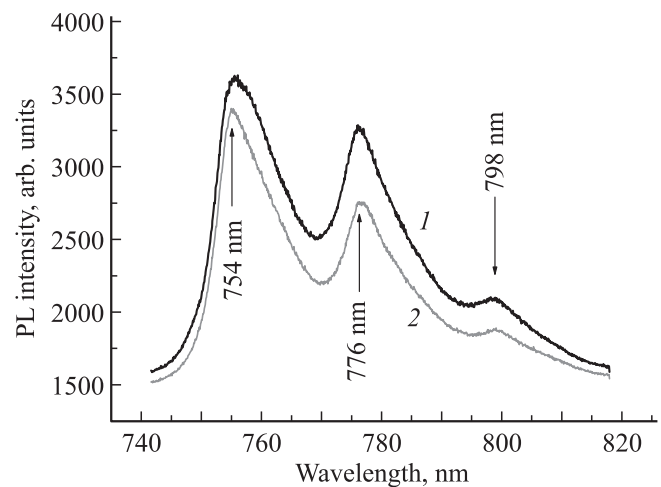


Рис. 5. Влияние изменения напряженности магнитного поля на вид спектров микро-ФЛ в длинноволновой области спектра структуры № 2. В, Т: 1 — 0, 2 — 5.

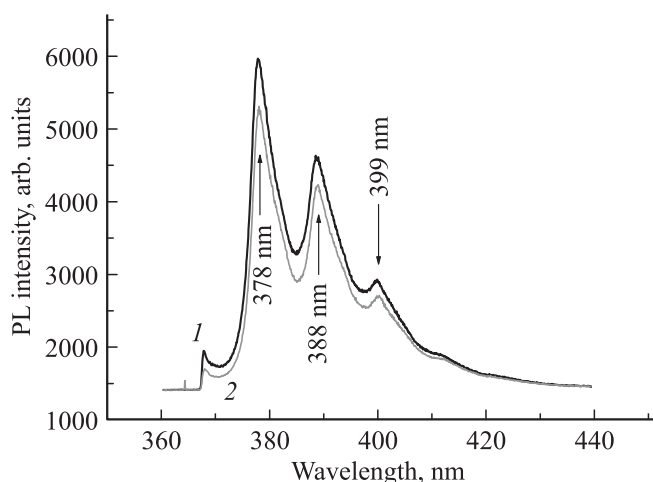


Рис. 6. Влияние изменения напряженности магнитного поля на вид спектров микро-ФЛ ($380 < \lambda < 450$ nm) структуры InGaN/GaN(Eu + Sm) (№ 3) при $T = 4.6$ К. В, Т: 1 — 0, 2 — 5.

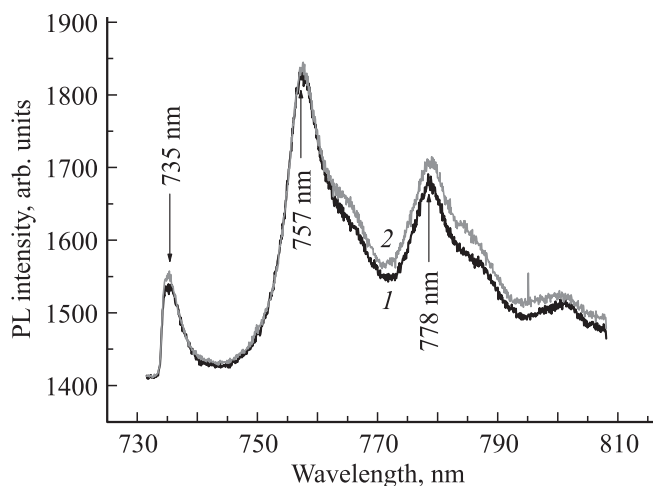


Рис. 7. Влияние напряженности магнитного поля на вид спектра микро-ФЛ в длинноволновой области спектра структуры № 3, при $T = 4.6$ К. В, Т: 1 — 0, 2 — 5.

туры № 2 сдвигается в коротковолновую область спектра и состоит из трех пиков ($\lambda_1 = 378$ nm, $\lambda_2 = 388$ nm, $\lambda_3 = 399$ nm). Наибольшую интенсивность имеет полоса излучения с пиком с $\lambda_1 = 378$ nm, несколько меньшую — полоса $\lambda_2 = 388$ nm. Данные линии излучения в слоях *n*-GaN связаны с появлением полосы, характерной для донорно-акцепторной рекомбинации при легировании РЗИ [4]. Полосу излучения с $\lambda_3 = 399$ nm приписывают излучению оборванных Ga–Ga-связей. Таким образом, для структуры № 3 изменение в процессе постростовой обработки при увеличении концентрации Eu и суммарной концентрации примесей Eu + Sm привело к существенному изменению вида спектра микро-ФЛ: сдвигу λ_{\max} в коротковолновую область спектра и, вероятно, пространственному расположению примеси в барьерном слое *n*-GaN, а также отсутствию линий

излучения, характерных для MQW на основе структур InGaN/GaN.

В длинноволновой области спектра структуры № 3 имеются три полосы излучения ($\lambda_1 = 735$ nm, $\lambda_2 = 757$ nm, $\lambda_3 = 778$ nm), на интенсивность которых не влияют изменения напряженности магнитного поля (рис. 7).

3. Обсуждение результатов

Полученные в настоящей работе результаты влияния магнитного поля, интенсивности возбуждения, 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 вызывает большее увеличение интенсивности излучения в структуре № 1 (InGaN/GaN(Sm)), чем в легированной Eu + Sm структуре № 2 (InGaN/GaN(Eu + Sm)), поскольку легирование одной из примесей — Eu (с зарядовыми состояниями Eu^{3+} и Eu^{2+}), как было показано в работе [8], может приводить к уменьшению интенсивности излучения при увеличении напряженности магнитного поля, а легирование другой примесью — Sm — к ее увеличению. Таким образом, имеет место суммарное влияние на взаимодействие носителей заряда полупроводниковой матрицы и двух парамагнитных примесей. Кроме того, вследствие существенно больших величин ионных радиусов Sm и Eu, чем у всех остальных компонентов структур (Ga, In, N), возникают дополнительные напряжения. При значительном увеличении напряженности магнитного поля вследствие возникновения магнитострикции 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 при наличии в полупроводниковой матрице парамагнитных примесей (Sm^{3+} , Eu^{3+}), а также магнитных примесей (Eu^{2+} и фоновой примеси Fe) следует рассматривать как с точки зрения изменения зонной структуры полупроводника, так и с точки зрения магнитострикционных явлений.

Обращает на себя внимание тот факт, что в структуре № 3 увеличение концентрации примеси Eu по сравнению с Sm (при том же интервале изменения напряженности магнитного поля — от 0 до 5 Т) приводит к большему изменению вида спектров микро-ФЛ в коротковолновой области: практически полному уменьшению интенсивности излучения в области излучения из квантовых ям ($\lambda = 420$ – 440 nm). В результате подобного легирования спектр микро-ФЛ структуры с MQW на основе InGaN/GaN становится подобным спектру макро-ФЛ слоя *n*-GaN, легированного Eu [9].

Особое положение реализуется в длинноволновой области спектра в структуре № 2: при увеличении напряженности магнитного поля уменьшается интенсивность излучения; значительно меньшее снижение наблюдается в структуре № 3 в той же области спектра.

4. Выводы

1. На основании результатов комплексных измерений спектров микрофотолюминесценции структур с квантовыми ямами на основе $\text{InGaN/GaN}\langle\text{Sm}\rangle$, определения концентрации, зарядового состояния легирующей примеси Sm показано, что воздействие магнитного поля приводит к реализации ван-флековского парамагнетизма для Sm^{3+} .

2. Измерения спектров микро-ФЛ при варьировании напряженности внешнего магнитного поля и введении парамагнитной и магнитной примесей дает дополнительную информацию о механизмах формирования спектров излучения в структурах с квантовыми ямами $\text{InGaN/GaN}\langle\text{Sm}\rangle$, $(\text{Eu} + \text{Sm})$.

3. В длинноволновой области спектра в легированных Sm , $\text{Eu} + \text{Sm}$ структурах InGaN/GaN влияние магнитного поля на вид спектров микро-ФЛ меньше, чем в коротковолновой области.

4. Увеличение концентрации легирующих атомов Eu , содержащих не только парамагнитные ионы Eu^{3+} , но и небольшую концентрацию ионов Eu^{2+} , которые вместе с фоновой примесью Fe могут быть магнитными примесями, приводит к сдвигу волны излучения в коротковолновую область спектра. Изменение намагниченности может способствовать изменению механизма передачи возбуждения от полупроводниковой матрицы к редкоземельным ионам, что в свою очередь приводит к изменению пространственного расположения примесей, уменьшению концентрации центров излучательной рекомбинации в структурах, излучению лишь из барьерного слоя $n\text{-GaN}$.

Список литературы

- [1] В.В. Криволапчук, М.М. Мездрогина, Э.Ю. Даниловский, Р.В. Кузьмин. ФТТ **51**, 2, 365 (2009).
- [2] С.Ю. Карпов, К.А. Булашевич, В.Ф. Мымрин. Тез. докл. 5-й Всерос. конф. „Нитриды галлия, индия, алюминия, структуры и приборы“. СПб (2008). С. 94.
- [3] Н.И. Бочкарева, В.В. Воронков, Р.Н. Горбунов, А.С. Зубрилов, Ю.С. Леликов, Ф.Е. Латышев, Ю.Т. Ребане, А.И. Цюк, Ю.Г. Шретер. ФТП **44**, 6, 822 (2010).
- [4] В.В. Криволапчук, М.М. Мездрогина, А.В. Насонов, С.Н. Родин. ФТТ **45**, 9, 1556 (2003).
- [5] Y. Fujiwara, A. Nishikawa, Y. Terray. Advanced display technologies. Int. Symp. St. Petersburg State of Technology (Technical University), St. Petersburg (2010). P. 210.
- [6] Y. Liu, Ch. Xu, Q. Yang. J. Appl. Phys. **105**, 084 701 (2009).
- [7] М.М. Мездрогина, Э.Ю. Даниловский, Р.В. Кузьмин. ФТП **44**, 3, 365 (2010).
- [8] М.М. Мездрогина, Е.С. Москаленко, Ю.В. Кожанова. ФТТ **53**, 8, 1596 (2011).
- [9] В.В. Криволапчук, М.М. Мездрогина. ФТТ **48**, 11, 2067 (2006).