

Примесные центры редкоземельных ионов (Eu, Sm, Er) в вюрцитных кристаллах GaN

© В.В. Криволапчук[†], Ю.В. Кожанова*, В.В. Лундин, М.М. Мездрогина, С.Н. Родин, Ш.А. Юсупова

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

* Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
195251 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 16 февраля 2004 г. Принята к печати 16 февраля 2004 г.)

Легирование нитрида галлия (GaN) примесями Eu, Sm, Er производилось с помощью метода диффузии. Поведение редкоземельных примесей (образование донорных или акцепторных уровней в запрещенной зоне GaN) коррелирует с суммарной концентрацией дефектов, определяемых оптическими методами измерений, положением уровня Ферми в исходных и легированных кристаллах. Интенсивность линий излучения, характерных для внутрицентровых $f-f$ -переходов редкоземельных ионов, определяется суммарной концентрацией дефектов в исходной полупроводниковой матрице.

1. Введение

Широкозонные кристаллы нитрида галлия (GaN), легированные редкоземельными ионами (РЗИ), привлекают внимание широкого круга исследователей в связи с возможностью создания светоизлучающих приборов для различных областей спектра: для коротковолновой — при легировании тулием (Tm), для видимой и ближней инфракрасной — при легировании эрбием (Er), для длинноволновой — при легировании европием и самарием (Eu, Sm) [1–3]. В $p-i-n$ -структурах на основе GaN с РЗИ наличие широкозонной полупроводниковой матрицы позволяет им функционировать при температурах, равных или выше комнатной, поскольку температурное гашение фотолюминесценции (ФЛ) тем меньше, чем больше ширина запрещенной зоны полупроводника [4]. Независимость длины волны излучения на внутрицентровых $f-f$ -переходах РЗИ от типа полупроводниковой матрицы также является немаловажным фактором, определяющим актуальность подобного рода исследований. Кроме того, технология получения структур (при легировании РЗИ) на заданную область спектра, соответствующую длине волны излучения внутрицентрового $f-f$ -перехода РЗИ, значительно проще технологии изготовления многокомпонентных эпитаксиальных структур [5]. Для успешного решения такого рода задач необходимо определить природу обусловленных введением РЗИ состояний и отвечающих им энергетических уровней, поскольку они (наряду с дефектами матрицы) определяют кинетику электронных возбудений системы.

Несмотря на обширные исследования в данной области, вплоть до настоящего времени не было известно, являются ли РЗИ в полупроводниковых матрицах донорами или акцепторами. Известно, что РЗИ в полупроводниковой матрице могут находиться в различных зарядовых состояниях. При введении в полупроводниковую матрицу Eu, Sm, Er чаще всего реализуются

зарядовые состояния (2^+), (3^+), причем какая-то часть ионов данного типа может быть в зарядовом состоянии (2^+), другая в (3^+) и соотношение их концентраций определяется концентрацией дефектов в полупроводниковой матрице [5]. Ранее в работе [6] на примере Er в GaN было показано, что РЗИ являются примесями замещения и, следовательно, должны быть в данной полупроводниковой матрице донорами или акцепторами. Однако вплоть до настоящего времени природа примесных центров РЗИ не была определена. В работе [7] исследовалось влияние методов введения РЗИ в полупроводниковую матрицу GaN на вид спектров ближне-красовой фотолюминесценции (БКФЛ) и интенсивность линий излучения, характерных для внутрицентровых $f-f$ -переходов Er.

Цель данной работы заключалась в определении природы примесных состояний (доноры или акцепторы) редкоземельных металлов (Eu, Sm, Er), введенных в эпитаксиальные слои GaN, и выяснении влияния корреляции между этими состояниями и дефектами исходной матрицы GaN на особенности спектров фотолюминесценции в кристаллах GaN, легированных РЗИ.

2. Эксперимент

В данной работе РЗИ в кристаллы GaN вводили, как и в работе [8], с помощью метода диффузии. Легирующие примеси Sm, Eu, Er вводили в каждую группу кристаллов при одинаковых технологических условиях — в одном технологическом цикле производили напыление пленок и последующий отжиг в атмосфере аммиака при температуре 1000–1050°C в течение 1–1.5 ч [8]. Как и в работе [7], для реализации возможности более широкого варьирования концентрации дефектов в исходной полупроводниковой матрице использовали кристаллы, полученные двумя различными методами: хлорид-гидридной газофазной эпитаксией в открытой системе (ГФЭ, HVPE) и разложением металлорганических соединений (МОС-гидридная эпитаксия, МОСVD).

[†] E-mail: vlad.krivol@pop.ioffe.rssi.ru

Основными источниками информации о концентрации дефектов в исходных кристаллах, так же как и в работе [8], являются спектры ФЛ, данные измерений концентрации носителей по методу Ван дер Пау (эффект Холла), результаты исследования морфологии поверхности с помощью электронного микроскопа, данные рентгеноструктурного анализа (ширина кривой дифракционного отражения), положение уровня Ферми (определяемое из концентрации носителей, плотности состояний в зоне проводимости и табличных данных о величине функции Ферми) при температурах $T = 77, 300$ К в исходных (нелегированных) и легированных РЗИ кристаллах GaN.

Для нелегированных кристаллов GaN, полученных методом HVPE, при $T = 300$ К уровень Ферми расположен выше дна зоны проводимости на 0.085 эВ, при $T = 77$ К — выше дна зоны проводимости на 0.03 эВ.

Для кристаллов GaN, полученных методом MOCVD, при $T = 300$ К уровень Ферми расположен выше дна зоны проводимости на 0.0173 эВ, при $T = 77$ К уровень Ферми расположен ниже дна зоны проводимости. Концентрация и тип дефектов в исходных и легированных кристаллах оценивались с помощью оптической спектроскопии (спектров ФЛ) — а именно, по интенсивности и положению линий излучения D^0, x и A^0, x , обусловленных рекомбинацией на нейтральных донорах и акцепторах, ширине линий на полувысоте (FWHM), эволюции спектров ФЛ при варьировании интенсивности возбуждения. Используемые в данной работе РЗИ имели различное зарядовое состояние: ион Er имеет одно зарядовое состояние (3^+), а ионы Eu, Sm — переменные значения (2^+) и (3^+) [1,2]. Зарядовое состояние примесного иона Eu определялось с помощью мессбауэровской спектроскопии.

В работе [7], посвященной исследованиям влияния легирования РЗИ на спектры фотолюминесценции кристаллов GaN, показано, что метод введения примеси определяет вид спектра ФЛ. При введении РЗИ в процессе роста наблюдаются линии излучения, характерные для БКФЛ и внутрицентровых $f-f$ -переходов РЗИ. При введении РЗИ методом имплантации БКФЛ не наблюдается, наблюдаются лишь линии излучения, характерные для $f-f$ -переходов РЗИ, что может быть свидетельством большого количества дефектов, инициированных имплантацией. В данной работе для введения РЗИ использовался метод диффузии.

Для корректного сравнения спектров излучения разных кристаллов GaN контролируемые параметры — угол падения луча, интенсивность возбуждающего света, температура — были постоянными.

Оптические измерения проводились на дифракционном спектрометре СДЛ-2 с обратной линейной дисперсией 1.3 нм/мм в области краевой люминесценции GaN. В качестве источников излучения, возбуждающего ФЛ, использовалось несколько типов лазеров. Для возбуждения фотолюминесценции в стационарном режиме использовались:

1) непрерывный He-Cd-лазер с длиной волны излучения $\lambda = 3250$ Å и мощностью излучения 5 мВт (межзонное возбуждение GaN);

2) непрерывный аргоновый лазер типа ЛГ-106М4 с мощностью излучения 0.5 Вт/см² и селекцией длины волны излучения с помощью поворотной призмы, установленной на месте глухого зеркала, что позволяло получать генерацию на нескольких длинах волн, $\lambda_1 = 5145$ Å, $\lambda_2 = 4880$ Å, $\lambda_3 = 4765$ Å (возбуждение внутрицентровых переходов редкоземельных ионов);

3) ксеноновая и галогеновая лампы с набором светофильтров (возбуждение внутрицентровых переходов редкоземельных ионов).

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Нелегированные кристаллы GaN были разбиты на несколько групп в зависимости от предварительной оценки типа дефектов в них:

1) кристаллы, имеющие в спектрах только линии, соответствующие БКФЛ, но с разной величиной FWHM ($27-300$ мэВ);

2) кристаллы с неоднородно уширенной линией БКФЛ и кроме того имеющие полосу излучения при $3.26-3.17$ эВ — донорно-акцепторную полосу ФЛ (ДАФЛ), интенсивность которой может превышать на порядки интенсивность БКФЛ;

3) кристаллы, имеющие в основном глубокие дефекты, являющиеся эффективными центрами безызлучательной рекомбинации, вывод о существовании которых сделан на основании малых величин интенсивности линии БКФЛ и FWHM ($7-9$ мэВ, т.е. $< kT$) [8].

При анализе спектров ФЛ основное внимание уделялось интенсивности линий внутрицентровых $f-f$ -переходов на длинах волн 1.54 и 0.54 мкм (Er), 0.72 мкм (Sm), 0.35 мкм (Eu^{2+}), 0.54 и 0.66 мкм (Eu^{3+}), а также эволюции полосы БКФЛ, имеющей неоднородный характер уширения [8], изменению ее ширины. Согласно данным работы [8], концентрация носителей в исследуемых кристаллах, полученных методом HVPE, была $> 10^{18}$ см⁻³, поскольку величина FWHM составляла $180-300$ мэВ. В кристаллах, полученных MOCVD, величина FWHM составляла $18-27$ мэВ, т.е. концентрация носителей примерно на порядок меньше.

С целью выяснения влияния постростовой обработки — отжига в атмосфере аммиака или легирования РЗИ с последующим отжигом в той же атмосфере — кристалл был разделен на две части. На одной части кристалла был проведен только отжиг в атмосфере аммиака (NH_3 , температура $T_a = 1050^\circ\text{C}$, длительность $t_a = 1$ ч), а на другой — легирование Er (GaN(Er)) с последующим отжигом в тех же условиях. Спектры ФЛ представлены на рис. 1. Видно, что отжиг изменил вид спектра (ср. кривые *a* и *b*) — уменьшилась интенсивность полосы донорно-акцепторной рекомбинации (D-A), но не наблюдалось ни изменения интенсивности, ни сдвига положения максимума БКФЛ, ни величины

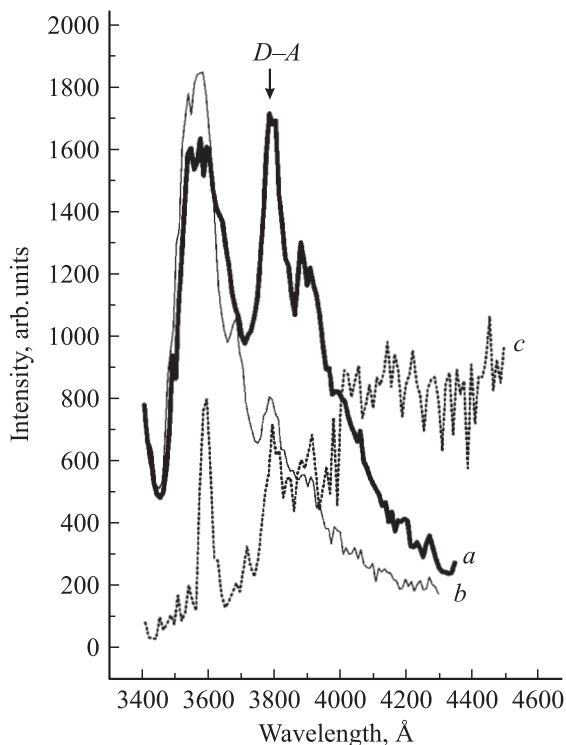


Рис. 1. Влияние отжига в атмосфере аммиака (NH_3) и легирования Er на вид спектра ближкрасовой фотолуминесценции GaN (HVPE): *a* — исходный кристалл, *b* — отожженный в аммиаке, *c* — легированный Er. $T = 77$ K.

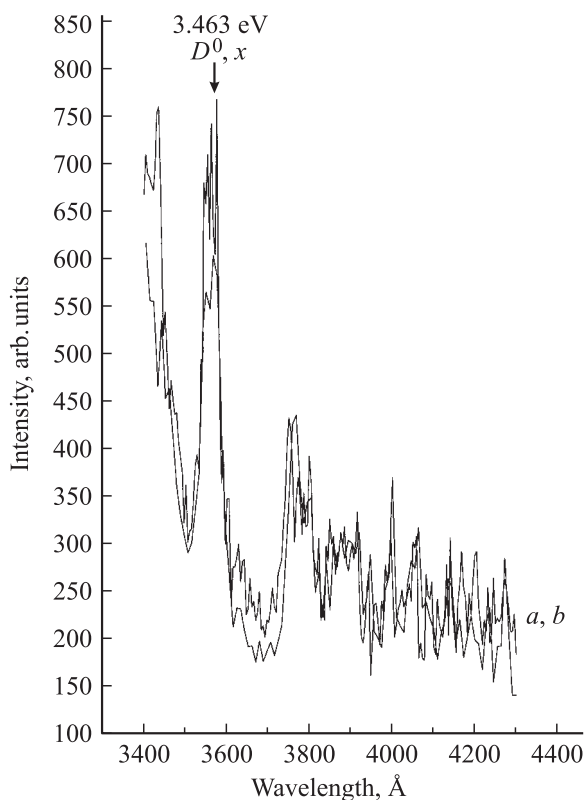


Рис. 2. Ближкрасовая фотолуминесценция GaN (Sm) (MOCVD): *a* — исходный кристалл, *b* — легированный Sm. $T = 77$ K.

FWHM. После легирования Er и отжига (кривая *c*) наблюдались существенные изменения вида спектра — интенсивность БКФЛ уменьшилась при одновременном уменьшении FWHM, интенсивность ДАФЛ также уменьшилась. Можно предположить, что результатом только отжига является уменьшение концентрации донорно-акцепторных пар, а результатом легирования Er — трансформирование мелких дефектов в глубокие [8].

Кристаллы первой группы. Для кристаллов, полученных методом MOCVD, спектры ФЛ с $\text{FWHM} = 15\text{--}27$ мэВ до и после легирования Sm приведены на рис. 2. При легировании другими РЗИ спектры имели такой же вид. Видно, что спектр БКФЛ D^0, x после легирования практически не изменяется. Не изменяется в результате легирования концентрация носителей, следовательно, положение уровня Ферми также не изменяется.

В длинноволновой области спектра имеются линии излучения, характерные для внутрицентровых $f\text{--}f$ -переходов РЗИ: 0.54 и 1.55 мкм в Er, 0.716 мкм в Sm^{2+} , 0.66 мкм в Eu^{3+} (см. рис. 3).

Для кристаллов, полученных методом HVPE, спектры приведены на рис. 4 (*a* — исходный кристалл, *b* — легированный Er). Видно, что спектры уширены — величина FWHM в различных исходных кристаллах менялась от 120 до 300 мэВ. Неоднородное уширение возникает вследствие того, что длины волн излучения, отвечающие излучательной рекомбинации носителей, локализованных на разных мелких центрах, несколько различны. Причины неоднородного уширения спектров подробно рассмотрены в работе [8]. Существенное различие FWHM линии БКФЛ в исходных образцах определяется разной концентрацией разнообразных дефектов в этих образцах. Интенсивность излучения линии БКФЛ и FWHM зависят от концентрации излучательных и безызлучательных состояний и транспорта носителей к ним. Параметры транспорта носителей определяются в свою очередь хвостами плотности состояний в запрещенной зоне и положением уровня протекания [8]. Отсюда следует, что при одинаковых условиях эксперимента образцы, в которых проявляется разная интенсивность ФЛ, различаются прежде всего концентрацией дефектов. Эти дефекты порождают как глубокие уровни (существенно уменьшающие время жизни свободных носителей), так и флуктуации плотности зонных состояний.

В случае легирования Er, имеющим одно зарядовое состояние (3^+), энергия максимума линии БКФЛ не отличается от энергии максимума в нелегированном кристалле и соответствует линии излучения экситонов, связанных на нейтральных донорах, D^0, x — 3.463 эВ (3579 нм). Изменение концентрации носителей при легировании до $8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ незначительно (10^{19} см^{-3} в нелегированном кристалле), следовательно, изменение положения уровня Ферми в результате легирования незначительно — при $T = 77$ K на 0.006 эВ. Можно предположить, что концентрация электрически активных центров меньше, чем оптически активных, поскольку

изменения вида спектра БКФЛ более существенны, чем изменения концентрации носителей, а следовательно, и положения уровня Ферми. Возможной причиной такого поведения введенной примеси является образование

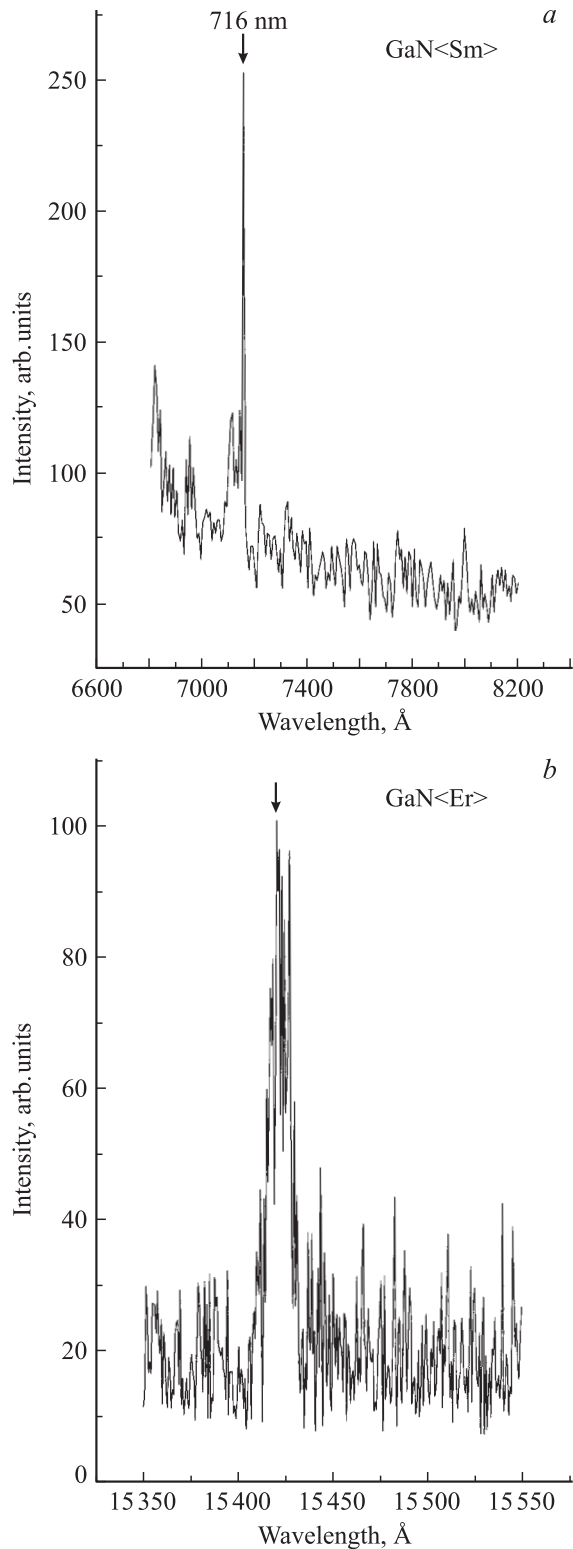


Рис. 3. Спектры фотолюминесценции в длинноволновой области: *a* — GaN<Sm> (MOCVD), *b* — GaN<Er> (MOCVD). $T = 77$ К.

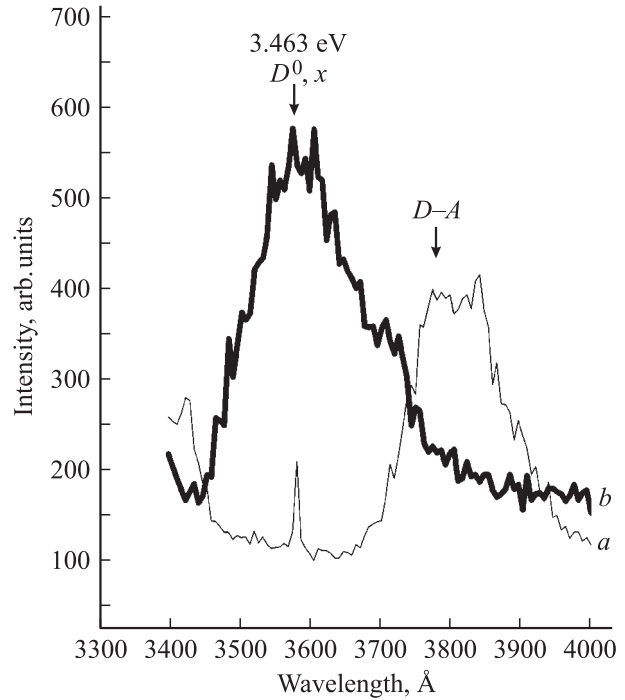


Рис. 4. Близкрасовая фотолюминесценция GaN<Er> (HVPE): *a* — исходный кристалл, *b* — легированный Er. $T = 77$ К.

различных комплексов РЗИ с примесями [5,8], имеющимися в кристалле. В то же время интенсивность линий излучения, характерных для внутрицентровых $f-f$ -переходов РЗИ, в кристаллах GaN, полученных методом HVPE, значительно меньше по сравнению с кристаллами, полученными методом MOCVD. Таким образом, по всей вероятности, механизм возбуждения редкоземельного иона в GaN различен. В кристаллах, имеющих при температуре измерения спектров ($T = 77$ К) уровень Ферми ниже дна зоны проводимости, возбуждение внутрицентровых переходов обусловлено захватом носителя на РЗИ. В случае расположения уровня Ферми выше дна зоны проводимости возбуждение обусловлено захватом на комплекс РЗИ–примесь.

Кристаллы второй группы. На рис. 5 представлены результаты по легированию Eu кристалла GaN, имеющего ДАФЛ, интенсивность которой больше интенсивности БКФЛ. После легирования положение максимума БКФЛ изменилось: в исходном кристалле 358.4 нм, а после легирования 357.8 нм. Таким образом, имеет место сдвиг максимума в длинноволновую область и, кроме того, наблюдается резкое сужение линии БКФЛ, полностью исчезает полоса ДАФЛ и появляется полоса в области 410–440 нм. Можно предположить две причины столь существенного изменения вида спектра: трансформирование мелких дефектов в глубокие (о чем свидетельствует уменьшение интенсивности и FWHM линии БКФЛ) и наличие линии излучения, характерной для внутрицентровых $f-f$ -переходов иона Eu^{2+} .

С целью определения зарядового состояния примесного иона Eu использовали мессбаэровскую спектроскопию на ^{151}Eu с применением стандартного спектрометра МС-2201. Измерения проводились при комнатной температуре. Поглотителем служили исследуемые кристаллы GaN(Eu) и $^{151}\text{Sm}_2\text{O}_3$. Спектры представляли собой наложение двух линий, относительные интенсивности которых заметно меняются от образца к образцу. Линия

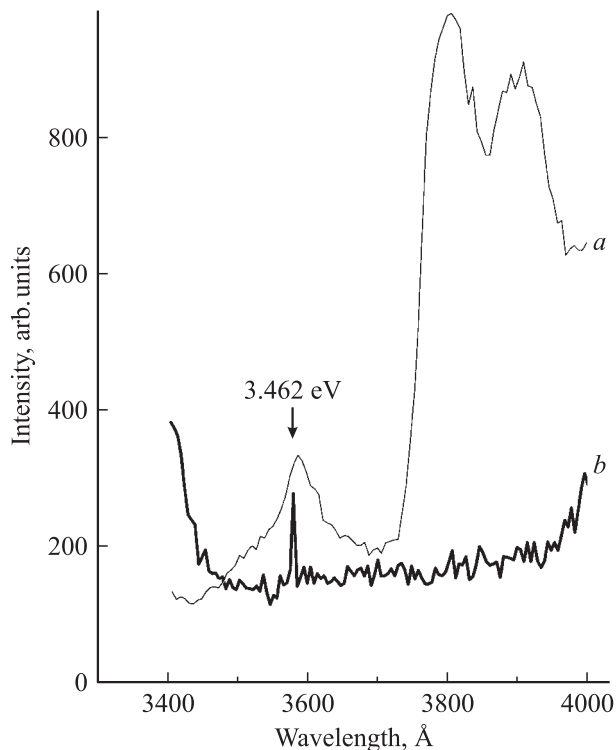


Рис. 5. Близкряевая фотолуминесценция GaN(Eu) (HVPE): *a* — исходный кристалл, *b* — легированный Eu. $T = 77$ К.

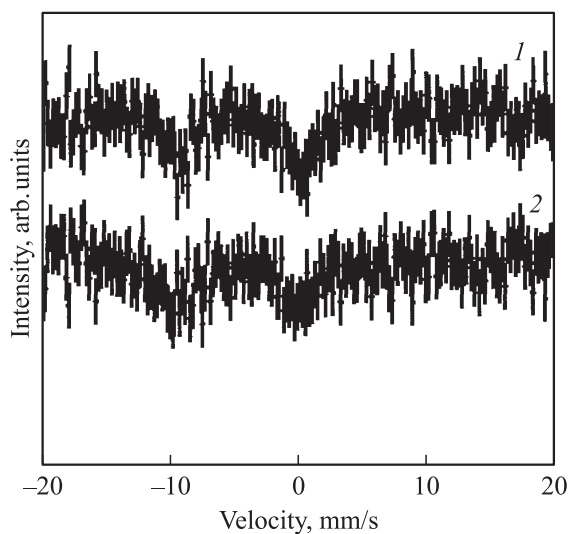


Рис. 6. Мессбаэровские спектры GaN(Eu + Eu). *1, 2* — кристаллы с существенно разной концентрацией Eu.

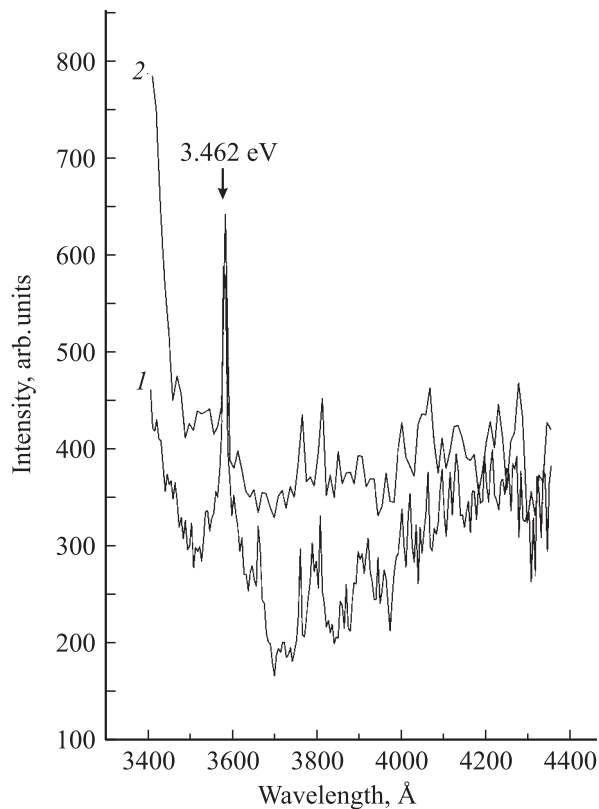


Рис. 7. Спектры близкряевой фотолуминесценции GaN(Eu + Eu). $T = 77$ К. *1, 2* — кристаллы с существенно разной концентрацией Eu.

с изомерным сдвигом 0.2 мм/с отвечает ионам Eu^{3+} , а линия с изомерным сдвигом 9.5 мм/с отвечает ионам Eu^{2+} . Спектры заметно уширены (экспериментальная ширина 2.8 мм/с) по сравнению с удвоенной естественной шириной (1.36 мм/с), что типично для мессбаэровских спектров ^{151}Eu . Следует отметить, что концентрация примесных ионов в образцах для мессбаэровских измерений была увеличена не менее чем в 2 раза (обозначим $\langle \text{Eu} + \text{Eu} \rangle$) по сравнению с концентрацией примесных ионов Eu в кристалле GaN, спектр ФЛ которого представлен на рис. 5. Это обусловлено меньшей разрешающей способностью мессбаэровской спектроскопии по сравнению с оптической. На рис. 6 представлены мессбаэровские спектры двух кристаллов с увеличенной, но разной концентрацией Eu. Видно, что ион Eu имеет два зарядовых состояния: (2^+) и (3^+). Спектры ФЛ тех же кристаллов с увеличенной концентрацией Eu представлены на рис. 7. Видно, что при таком сильном легировании спектры ФЛ двух кристаллов практически одинаковы, как и мессбаэровские спектры, т.е. данные мессбаэровской спектроскопии коррелируют с данными оптических исследований.

На рис. 8 и 9 показаны изменения спектров исходных кристаллов *N1*, *N2*, различающихся величиной отношения интенсивностей полосы ДАФЛ и линии БКФЛ, а также их спектры после легирования Eu. После леги-

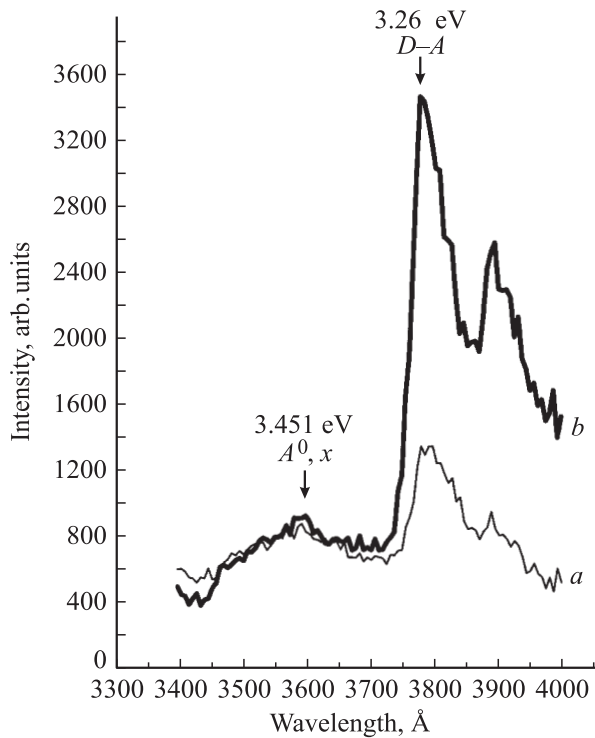


Рис. 8. Близкрасовая фотолюминесценция GaN(Er), образец *N1*: *a* — исходный кристалл, *b* — легированный Er. $T = 77$ К.

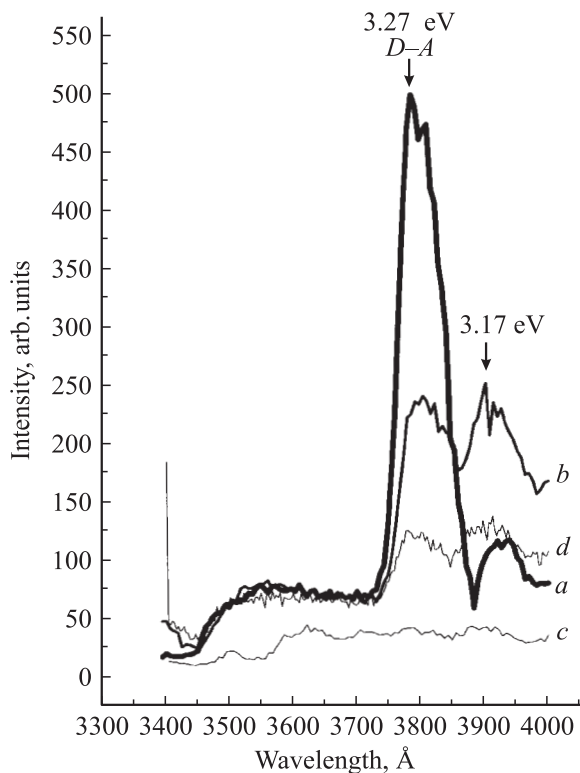


Рис. 9. Близкрасовая фотолюминесценция GaN(Er), образец *N2*: *a* — исходный кристалл, *b* — легированный Er, *c* — легированный Er и сошлифованный на глубину 20 мкм, *d* — дополнительно легированный Er после шлифовки. $T = 77$ К.

рования в кристалле *N1* интенсивность ДАФЛ увеличилась (рис. 8); следовательно, увеличилась концентрация донорно-акцепторных пар и, следовательно, Er — акцепторная примесь, как и Mg, введение которого вызывает появление ДАФЛ в GaN [8]. В другом кристалле, *N2*, после легирования интенсивность ДАФЛ уменьшилась (рис. 9). Одной из причин столь резкого различия в ФЛ двух образцов является разница в размерах кристаллитов — больший в кристалле *N1* по сравнению с *N2*. С целью проверки этого предположения поверхность образца была сошлифована на глубину более 20 мкм, т. е. существенно превышающую глубину проникновения легирующего компонента, а затем отполирована. На рис. 9 приведены спектры кристалла после полировки (кривая *c*) и после введения легирующих ионов (кривая *d*). Видно, что после полировки интенсивности и БКФЛ, и ДАФЛ незначительны, а после введения Er возросла интенсивность только полосы ДАФЛ, которая стала превышать интенсивность линии БКФЛ. Таким образом, реализована ситуация, аналогичная наблюдаемой в кристалле *N1*. В спектре кристалла *N1* наблюдаются в длинноволновой области спектра линии излучения, характерные для внутрицентровых $f-f$ -переходов Er (1.54 мкм), но отсутствующие в спектре кристалла *N2*. Наличие ДАФЛ в спектрах кристаллов означает наличие дополнительного канала рекомбинации, который затрудняет, по всей вероятности, заселение редкоземельных центров, и поэтому излучение на длине волны 1.54 мкм не наблюдается. Интенсивность линии излучения в зеленой области спектра (0.54 мкм) достаточна для регистрации при чувствительности приборов, используемых в данной работе.

Кристаллы третьей группы. Спектры ФЛ кристаллов, имеющих только глубокие дефекты в исходном состоянии, представлены на рис. 10. Легирование РЗИ подобных кристаллов приводит, как правило, к трансформированию глубоких дефектов в мелкие [8]. На рис. 10 показаны спектры исходных кристаллов GaN (кривые 1, 3) и легированных соответственно Sm (кривая 2), Eu (кривая 4). Видно, что после легирования величины интенсивности FWHM, БКФЛ и ДАФЛ увеличиваются, а положение максимума БКФЛ не меняется и остается по-прежнему равным 3.463 эВ, т. е. соответствующим излучению с рекомбинацией на нейтральном доноре, D^0, x . Поскольку имеет место увеличение интенсивности БКФЛ, а также появление ДАФЛ, можно предположить, что РЗИ являются акцепторами.

На основании совокупности всех полученных данных можно сделать вывод, что РЗИ в полупроводниковой матрице могут быть как донорами, так и акцепторами в зависимости от концентрации дефектов в исходном кристалле. С другой стороны, концентрация дефектов в исходном кристалле будет определять зарядовое состояние введенного РЗИ — реализуется ли состояние (2^+) или (3^+), как, например, в случае введения Eu.

Можно предположить пространственное упорядочение дефектов в кристаллах GaN, легированных РЗИ.

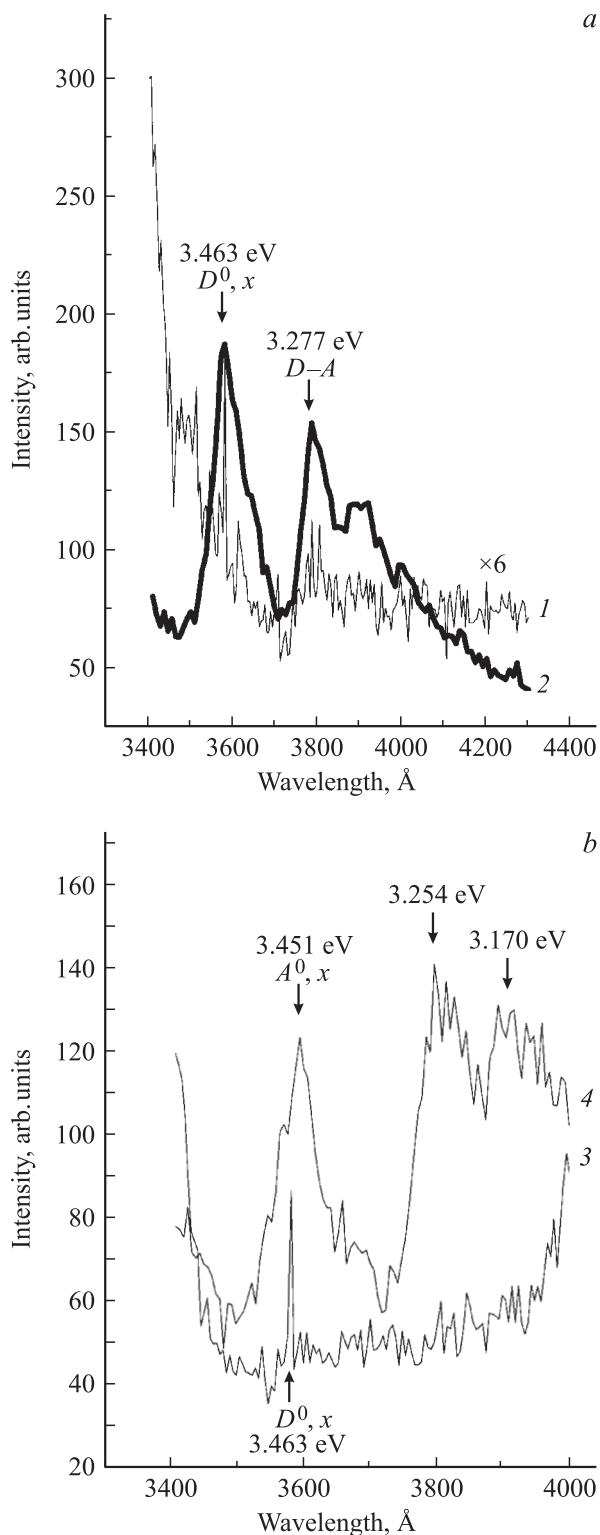


Рис. 10. Спектры ближесральной фотолуминесценции GaN(Sm) (a) и GaN(Eu) (b). a: 1 — исходный кристалл, 2 — легированный Sm; b: 3 — исходный кристалл, 4 — легированный Eu. $T = 77$ K.

Управляющими параметрами этого процесса в совокупности являются следующие: зарядовое состояние РЗИ, которое вызывает изменение типа связей — от ковалентной, характерной для G–N, до ионной Eg–N (поскольку РЗИ является примесью замещения, как было показано ранее [6]); концентрация и тип дефектов в полупроводниковой матрице. Эти процессы наблюдались только в кристаллах с большой концентрацией носителей, т.е. примесей. В кристаллах, полученных методом MOCVD, подобного не наблюдалось.

4. Заключение

По результатам исследований можно сделать следующие основные выводы: РЗИ в вюрцитных кристаллах GaN могут быть как донорами, так и акцепторами, что определяется суммарной концентрацией дефектов в исходной полупроводниковой матрице; интенсивность линий излучения, характерных для внутрицентровых переходов РЗИ в эпитаксиальных слоях, коррелирует с концентрацией дефектов в исходной полупроводниковой матрице — чем меньше концентрация дефектов, тем больше интенсивность линий внутрицентровых переходов.

По всей вероятности, механизм диффузии РЗИ в GaN определяется концентрацией дефектов в исходной матрице. При увеличении концентрации дефектов в матрице (уровень Ферми вблизи дна зоны проводимости) РЗИ, по-видимому, встраиваются в междоменное пространство мозаичной структуры, и в таком случае все изменения в спектрах ФЛ свидетельствуют об изменениях в данных областях.

Работа выполнена при поддержке программы Министерства науки, промышленности и технологий РФ „Оптические и нелинейно-оптические свойства наноструктур“.

Список литературы

- [1] A.J. Steckel, R. Birkhahn. Appl Phys. Lett., **73**, 1700 (1998).
- [2] A.J. Steckel, M. Garter, R. Birkhahn, J.D. Scofield. Appl. Phys. Lett., **73**, 2450 (1998).
- [3] S. Kim, S.J. Rhee, D.A. Turnbull. Appl. Phys. Lett., **71**, 2662 (1997).
- [4] A.J. Neuhalfen, B.W. Wessels. Appl. Phys. Lett., **60**, 2572 (1992).
- [5] М.М. Мездрогина, Е.И. Теруков, Н.П. Серегин, П.П. Серегин, И.Н. Трапезникова, Ф.С. Насрединов. ФТП, **36**, 1252 (2002).
- [6] В.В. Криволапчук, М.М. Мездрогина, С.Д. Раевский, А.П. Скворцов, Ш.А. Юсупова. Письма ЖТФ, **28**, 19 (2002).
- [7] S. Kim, R.L. Henry, A.E. Wicken, D.E. Koleske, S.J. Rhee, J.O. White. J. Appl. Phys., **90**, 252 (2001).
- [8] В.В. Криволапчук, М.М. Мездрогина, А.В. Насонов, С.Н. Родин. ФТТ, **45**, 1556 (2003).

Редактор Л.В. Шаронова

Impurity centres of (Eu, Sm, Er) rare-earth ions in wurtzite GaN crystals

V.V. Krivolapchuk, Yu.V. Kozhanova, V.V. Lundin,
M.M. Mezdrogina, S.N. Rodin, Sh.A. Yusupova*

Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

* St. Petersburg State Polytechnical University,
195251 St. Petersburg, Russia