

# Дефектная люминесценция пленок GaN:Zn, отожженных в высокочастотной плазме аммиака

© Г.А. Сукач<sup>¶</sup>, В.В. Кидалов\*, А.И. Власенко, Е.П. Потапенко

Институт физики полупроводников Национальной академии наук Украины,  
03028 Киев, Украина

\* Бердянский государственный педагогический институт,  
71118 Бердянск, Украина

(Получена 15 декабря 2002 г. Принята к печати 4 февраля 2003 г.)

Проведены исследования влияния отжига в радикалах азота, полученных путем обработки аммиака в высокочастотном разряде, на люминесцентные свойства пленок GaN:Zn, выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии на сапфировых подложках (0001). По мере повышения температуры отжига наблюдалось монотонное уменьшение фиолетовой (2.88 эВ) и близкрасевой (3.48 эВ) полос фотолюминесценции. В результате отжига в радикалах азота при температурах 500–750°С обнаружены новые полосы с энергиями максимумов 3.27 и 3.42 эВ, интенсивность которых увеличивалась с ростом температуры отжига. Проведен критический анализ механизмов образования и природы всех полос. Установлено, что полосы люминесценции 2.88, 3.42 и 3.27 эВ характерны для пленок GaN, полученных с помощью практически всех технологий, и связаны с простыми дефектами структуры. Экспериментально доказано участие кислорода в формировании полосы 3.42 эВ.

## 1. Введение

Известно, что электрофизические и особенно люминесцентные свойства пленок GaN существенно зависят не только от технологических условий роста, но и от последующих внешних обработок. Изменение параметров технологии и, в частности, постэпитаксиальных внешних воздействий позволяет управлять количеством и качеством квазиравновесных дефектов в пленках в широких пределах.

Так, в работе [1] была реализована возможность получения низкоомных образцов GaN *p*-типа проводимости, легированных элементами II группы. Был выбран путь сведения к минимуму эффекта самокомпенсации акцепторов собственными дефектами донорного типа, образованными как реакция материала на введение акцепторов в процессе легирования. Задача решалась за счет постэпитаксиальных прогревов полуизолирующих образцов GaN:Mg(Zn) в атмосфере азота (температура  $T_a \approx 700^\circ\text{C}$ ). В свою очередь исследование фотолюминесценции (ФЛ) позволяет установить природу и механизмы образования таких несовершенств. В работе [2] рассмотрен кратковременный высокотемпературный отжиг GaN в атмосфере молекулярного азота, однако он не привел к улучшению структурных и оптических характеристик пленки из-за разрушения поверхности и испарения азота из нитрида галлия. Для повышения эффективности внедрения азота в GaN требуется увеличение давления не молекулярного, а более активного в адсорбционном и диффузионном отношении атомарного азота, а также снижение температуры отжига. В работе [3] проведены исследования влияния отжига в атомарном азоте, полученного путем разложения молекулярного азота на отдельные возбужденные атомы (радикалы) в высокочастотной (ВЧ) плазме, на ФЛ высокоомных

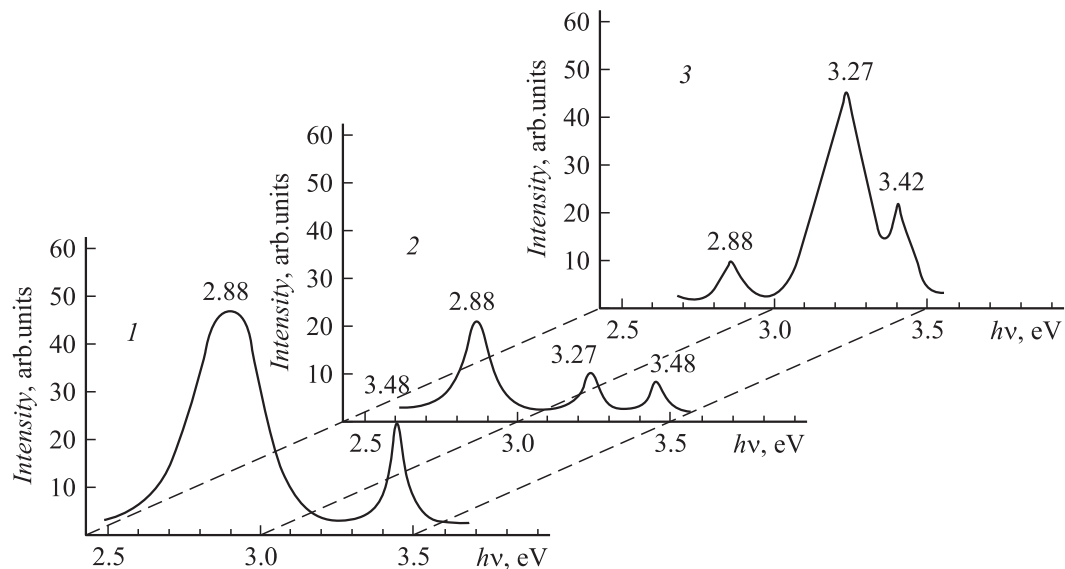
(полуизолирующих) пленок *n*-GaN:Zn (концентрация электронов  $n_0 = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ), выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках сапфира (0001). Обнаружено сначала незначительное увеличение интенсивности полосы 2.88 эВ вплоть до температур отжига  $T_a = 600^\circ\text{C}$ , а затем, по мере повышения  $T_a$ , уменьшение интенсивностей полос излучения с энергиями максимума  $h\nu_m = 2.88$  и  $3.48$  эВ и появление новой полосы с  $h\nu_m = 3.27$  эВ. Однако кинетическая эффективность образованных радикалов азота была недостаточно высокой из-за низкой мощности источника ВЧ разряда.

Было интересно провести исследование спектральных особенностей дефектной ФЛ и самих процессов дефектообразования после отжига в радикалах азота широко используемых в технических применениях низкоомных образцов *p*-GaN:Zn, концентрация основных носителей заряда в которых близка к их концентрации в материалах, применяемых при изготовлении коммерческих излучателей. Кроме того, с целью установления общих закономерностей привлекательным является исследование дефектообразования в пленках GaN, полученных наиболее распространенным в технологии методом МОС-гидридной эпитаксии (газофазной эпитаксии из металлорганических соединений), а также использование более эффективного метода получения радикалов азота не из молекулярного азота, а из аммиака с применением более мощного источника ВЧ разряда. Этим вопросам и посвящена настоящая работа.

## 2. Методика и результаты эксперимента

В данной работе исследовались пленки *p*-GaN:Zn с концентрацией основных носителей заряда  $p_0 = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Использовались пленки, выращенные методом МОС-гидридной эпитаксии на сапфировых

<sup>¶</sup> E-mail: sukach@isp.kiev.ua



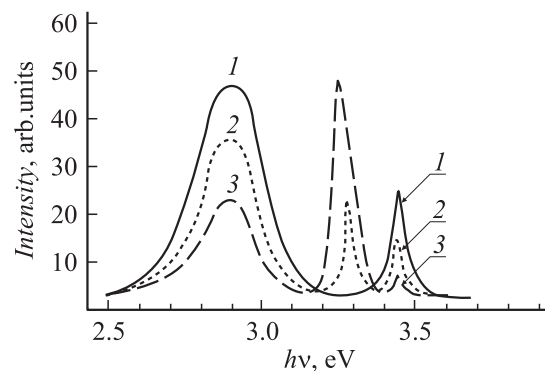
**Рис. 1.** Спектры фотолюминесценции пленок GaN:Zn до (1) и после обработки в активных радикалах азота, полученных из высокочастотной плазмы аммиака при давлении в разрядной камере  $10^{-3}$  мм рт. ст. и температурах 500 (2) и 750°C (3). Приведены энергии максимумов в эВ.

подложках ориентации (0001) (фирма Nichia Chemical Industries Ltd.). Отжиг пленок производился в течение 1–5 ч при температуре  $T_a = 500\text{--}750^\circ\text{C}$  в активных радикалах азота, полученных из аммиака  $\text{NH}_3$ , в проточной системе, подобной описанной в [4]. В качестве источника активации использовался разряд ВЧ генератора с рабочей частотой 40 МГц, мощность которого регулировалась в пределах  $P = 1\text{--}2$  кВт [5]. Для предотвращения повреждения поверхности GaN ионная компонента сепарировалась в сильном постоянном магнитном поле. Концентрация атомарных газов (азота, кислорода и др.) определялась с помощью метода разогрева каталитических образцов (платиновой проволоки), на которых происходит рекомбинация возбужденных атомов газов с последующим превращением атомов в молекулы. Определенная таким образом максимальная концентрация радикалов активных газов вблизи поверхности образца составляла величину  $10^{18}$  см $^{-3}$ . Вариация концентрации радикалов активных газов в разрядной камере осуществлялась путем изменения мощности ВЧ генератора; например, при давлении  $p = 10^{-3}$  мм рт. ст. поток радикалов азота, падающих на поверхность образца, регулировался в пределах  $10^{15}\text{--}10^{18}$  см $^{-2}$  · с $^{-1}$ . Выход активных радикалов азота в условиях нашего эксперимента на порядок превышал таковой в методе, использующем плазменный разряд в молекулярном азоте.

Для возбуждения ФЛ использовался импульсный азотный лазер ЛГИ-21 с длиной волны излучения  $\lambda = 337.1$  нм и длительностью импульса  $t_i \leq 10$  нс. Интенсивность возбуждения  $L$  варьировалась с применением нейтральных серых фильтров в диапазоне  $10^{18}\text{--}5 \cdot 10^{21}$  фотон/см $^2$  · с, что обеспечивало низкие и умеренные уровни возбуждения ( $\Delta n = \Delta p < (p_0 + n_0)$ ,

где  $n_0, p_0, \Delta n, \Delta p$  — соответственно концентрации равновесных и неравновесных электронов и дырок). Спектры ФЛ анализировались с помощью управляемого компьютером спектрального комплекса на основе монохроматора МДР-23 [6]. Суммарная величина систематической и случайной погрешности измерения длины волны с учетом влияния всей совокупности неинформативных и дестабилизирующих факторов не превышала 0.052 нм. Измерение спектров ФЛ осуществлялось с помощью оптического криостата при температуре жидкого азота.

Результаты исследования спектров ФЛ (на шкале энергий фотонов  $h\nu$ ) пленок  $p\text{-GaN:Zn}$ , обработанных в активированной газовой среде, представлены на рис. 1 и 2 (отжиг в радикалах азота), а также в таблице (отжиг в радикалах азота и кислорода). Исходные образцы (кривые 1 на рис. 1 и 2) имеют широкую несим-



**Рис. 2.** Спектры фотолюминесценции пленок GaN:Zn до (1) и после обработки в активных радикалах азота, полученных из плазмы аммиака при давлении в разрядной камере  $10^{-3}$  мм рт. ст., температуре 750°C и мощности высокочастотного разряда 1120 (2) и 1800 Вт (3).

Влияние режимов отжига в радикалах азота и чистого кислорода на интенсивность полос фотолюминесценции образцов GaN:Zn

Энергия полосы ФЛ, эВ	Интенсивность полос ФЛ, отн. ед.			
	Отжиг в атмосфере аммиака и остаточного кислорода			Отжиг в атмосфере чистого кислорода
	25°C	500°C	750°C	750°C
2.88	48.8	21.1	9.3	8.6
3.27	0	8.6	46.6	42.7
3.42	0	0	15.1	73.6
3.48	24.6	6.6	0	0

метричную полосу в фиолетовом диапазоне спектра с энергией максимума излучения  $h\nu_m = 2.88$  эВ и узкую ближкравую полосу излучения с энергией максимума  $h\nu_m = 3.48$  эВ. С ростом температуры отжига в высокоэффективных радикалах азота, полученных из аммиака (рис. 1), а также с ростом мощности ВЧ разряда (рис. 2) интенсивности  $I$  этих полос монотонно уменьшаются. Отметим практически синфазное уменьшение интенсивностей этих двух исходных полос ФЛ с ростом  $T_a$  пленок, а также с ростом мощности ВЧ разряда. В то же время после указанных технологических обработок в спектрах появляются новые полосы с энергиями максимумов  $h\nu_m = 3.27$  и  $3.42$  эВ. Интенсивность полосы с  $h\nu_m = 3.27$  эВ резко увеличивается с ростом как  $T_a$ , так и мощности ВЧ разряда (см. рис. 1 и 2); для полосы с  $h\nu_m = 3.42$  эВ интенсивность увеличивается только с ростом  $T_a$  (см. рис. 1). После отжига пленок в активных радикалах кислорода  $I$  интенсивность полосы с  $h\nu_m = 3.42$  эВ резко возрастала (таблица).

Для всех исследованных полос ФЛ наблюдалась степенная зависимость интенсивности от уровня лазерного возбуждения во всем исследованном диапазоне:  $I \propto L^\alpha$ . Для полос с  $h\nu_m = 2.88$ ,  $3.27$  и  $3.42$  эВ показатель степени  $\alpha$  был близок к единице ( $\alpha = 1.0-1.05$ ), а для ближкравой полосы ФЛ с  $h\nu_m = 3.48$  эВ близок к двум ( $\alpha = 1.8$ ).

### 3. Обсуждение результатов

Спектры ФЛ свидетельствуют об изменении дефектного состава пленок GaN в процессе их отжига в ВЧ разряде сепарированной плазмы, полученной из аммиака. Проанализируем полученные результаты для всех полос ФЛ.

#### 3.1. Фиолетовая полоса с $h\nu_m = 2.88$ эВ

Это — широко известная, характерная для большинства эпитаксиальных технологий полоса ФЛ, обусловленная присутствием в исходном GaN вакансий азота  $V_N$ . Наличие этой полосы является признаком нестехиометричности материала и недостаточного кристаллического качества выращенной пленки. Полосу

с максимумом вблизи  $h\nu_m = 2.88$  эВ наблюдали во многих работах [3,7–9]. Общее устоявшееся в литературе мнение таково: эта полоса связана с рекомбинацией носителей заряда внутри донорно-акцепторной пары (ДАП) [3,7], донором в которой является вакансия азота, а акцептором — примесь замещения. В качестве акцепторов рассматриваются цинк на месте галлия  $Zn_{Ca}$  (основной акцептор) и другие собственные дефекты, доминирующие при температурах  $T > 40$  К. С ростом температуры выращивания пленок концентрация доноров, как правило, возрастает. Многообразие типов акцепторов в таких ДАП и связанные с этим обстоятельством различные расстояния между компонентами ДАП (короткоживущие и долгоживущие ДАП) приводят к неоднородному уширению полосы с образованием затянутого длинноволнового фронта [1,3,9]. В уширении могут вносить также вклад эти же переходы с испусканием оптических и акустических фононов. Отметим, что самим положением максимума полосы ( $h\nu_m = 2.88$  эВ) можно легко управлять путем изменения парциального давления цинка в процессе выращивания (легирования) пленок. При вариации условий отжига эта полоса ведет себя по-разному. Так, после кратковременного высокотемпературного отжига пленок GaN в атмосфере молекулярного азота интенсивность ее увеличивалась [2], а после отжига в радикалах азота  $I$  сначала возрастала (вплоть до  $T_a = 600^\circ\text{C}$ ), а затем резко падала [3,7].

Монотонное падение интенсивности полосы с  $h\nu_m = 2.88$  эВ при повышении  $T_a$ , а также мощности ВЧ разряда в нашем случае свидетельствуют о том, что уже при незначительных внешних возмущениях (вариация температуры, давления и мощности ВЧ разряда) происходит развал ДАП типа  $V_N-Zn_{Ga}$ . Это обусловлено уменьшением концентрации  $V_N$  за счет замещения их активированными атомами азота из окружающей образец азотсодержащей среды.

Полученные результаты показали, что отжиг в активированной азотсодержащей среде низкоомных пленок  $p$ -GaN:Zn (где в качестве источника радикалов азота использовался аммиак и мощный ВЧ разряд) оказывает более сильное влияние на состав точечных дефектов, чем тот же отжиг в вакууме, параз азота или в радикалах азота, полученных с использованием менее мощного источника ВЧ разряда. Во всем диапазоне исследованных уровней возбуждения зависимость  $I(L)$  ( $I \propto N_A^0 N_D^0 \propto N_D \Delta n$ , где  $N_A^0$  и  $N_D^0$  — концентрации нейтральных акцепторов и доноров, а  $N_D$  — общая концентрация доноров) для полосы с  $h\nu_m = 2.88$  эВ имела практически линейный характер ( $\alpha = 1.05$ ).

#### 3.2. Ближкравая полоса с $h\nu_m = 3.48$ эВ

В работе [10] пик с  $h\nu_m = 3.48$  эВ  $\approx E_g$  ( $E_g$  — ширина запрещенной зоны) приписывался межзонной рекомбинации по двум перекрывающимся каналам: излучательная рекомбинация связанного на мелком доноре электрона и дырки валентной зоны, а также рекомбинация

связанных в излучательном комплексе свободного экситона электрона и дырки. В нашем случае необходимо учитывать оба канала. Об этом свидетельствует наклон зависимости  $I(L)$  для этой полосы ( $\alpha \approx 1.8$ ) в области  $L = 10^{20} - 5 \cdot 10^{21}$  фотон/см<sup>2</sup>·с, отличный от чисто квадратичного ( $\alpha = 2$ ), характерного для излучательной рекомбинации свободных электронов и дырок. Отметим, что излучение, обусловленное различного вида связанными экситонами, гасится уже при температуре выше 50 К, так что его вкладом в близкраевую поток можно пренебречь. Быстрое температурное гашение плосы ФЛ с максимумом при  $h\nu_m = 3.48$  эВ с ростом  $T_a$  и мощности ВЧ разряда, по-видимому, обусловлено включением более эффективного канала излучательной (см. далее) и (или) безызлучательной рекомбинации с участием ранее упомянутого мелкого донора, а также акцепторов, связанных с избыточными межузельными атомами азота, которые перехватывают рекомбинационный поток близкраевого излучения.

Обсудим далее поведение новых полос ФЛ, возникших после ВЧ отжига.

### 3.3. Ультрафиолетовая полоса с $h\nu_m = 3.27$ эВ

Во многих работах [11–15] эта полоса связывалась с рекомбинацией ДАП. Отсутствие ее в исходных образцах, а также существенный рост ее интенсивности с увеличением  $T_a$  и мощности ВЧ разряда в плазме NH<sub>3</sub> свидетельствуют об активации (или скорее всего освобождении из другого комплекса) того или иного компонента ДАП. Акцептором в данной паре может выступать глубокий акцептор, а в качестве другого ее компонента — мелкий собственный дефект донорного типа с глубиной залегания  $E_d \approx 30$  мэВ [16]. В принципе это может быть тот же донор, который до обработки участвовал в формировании близкраевой полосы с  $h\nu_m = 3.48$  эВ. Рост  $I = f(T_a, P)$  для полосы с  $h\nu_m = 3.27$  эВ свидетельствует о резком росте концентрации центров акцепторного типа, которые, вероятнее всего, связаны со смещением стехиометрии пленок GaN в сторону избытка азота в процессе их ВЧ обработки в плазме аммиака. Наиболее вероятно, что это межузельный азот. Большая полуширина полосы ФЛ дает основание предполагать, что в формирование ее длинноволнового крыла вносят вклад фоннные повторения бесфонной линии [13], а в формирование ее коротковолнового крыла вносят вклад переходы (зона проводимости)–(акцепторный уровень Zn<sub>Ga</sub>) (энергия ионизации  $E_a \approx 0.34$  эВ, см. например [17]) или, вероятнее всего, межузельный азот. В пользу последнего свидетельствует незначительный сдвиг ( $\sim 0.025$  эВ) максимума полосы ДАП с  $h\nu_m = 3.27$  эВ в коротковолновую область при увеличении мощности ВЧ разряда, приводящем к сверхлинейному росту концентрации такого вида акцепторов (см. рис. 2). Форма этой полосы отлична от формы, присущей ДАП. Однако зависимость  $I(L)$  линейна ( $\alpha \approx 1$ ) во всем диапазоне исследованных  $L$ .

### 3.4. Полоса с $h\nu_m = 3.42$ эВ

Происхождение этого пика, который, по-видимому, является общей закономерностью пленок GaN, полученных при различных технологиях, кроме, как правило, молекулярно-лучевой и МОС-гидридной эпитаксий, — предмет острых дебатов.

Авторы работы [18] приписывали эту полосу экситону, связанному на структурных дефектах вдоль кристаллической оси  $c$  в гексагональном GaN, но природа дефектов ими не была рассмотрена. В работах [19,20] энергетическое положение этой полосы отождествляли с экситоном, связанным на структурных дефектах, расположенных на границах раздела между кубической и вюрцитной фазами, причем электрон считался расположенным в кубической, а дырки — в вюрцитной фазах [20]. В работе [21] пик вблизи  $h\nu_m = 3.42$  эВ (при  $T \approx 100$  К) приписывали ДАП, акцептором в которой служили остаточный углерод ( $E_a \approx 90$  мэВ) или вакансии галлия. Эту полосу можно также связать с остаточным кислородом в камере, как в работах [22,23]. В работе [23] появление новой полосы с максимумом  $h\nu_m = 3.42$  эВ объяснялось рекомбинацией свободных дырок с электронами, локализованными на донорных уровнях, обусловленных присутствием кислорода, концентрация которого возрастает с понижением уровня вакуумирования.

Для того чтобы однозначно установить природу полосы с  $h\nu_m = 3.42$  эВ и склониться к тому или иному механизму образования ДАП, были проведены две группы экспериментов.

Во-первых, исследовалась зависимость интенсивности полосы от давления остаточных газов ( $p$ ) в разрядной камере во время отжига пленок GaN в радикалах азота, полученных из плазмы аммиака. При повышении давления от  $10^{-3}$  до  $10^{-1}$  мм рт.ст. наблюдалось монотонное увеличение интенсивности приблизительно в 2.5 раза, т.е. связь между случайными величинами  $I$  и  $p$  могла быть представлена уравнением регрессии вида

$$I(p) = a_0 + a_1 p,$$

где  $a_0$  и  $a_1$  — коэффициенты регрессии, которые определяются по методу наименьших квадратов. Коэффициент корреляции, являющийся показателем приближения зависимости между измеряемыми величинами  $I$  и  $p$  к линейной, был близок к единице, что дает основание сделать вывод о практической функциональной связи  $I(p)$  и ее линейности.

Поскольку понижение вакуума (при практически неизменной концентрации активных радикалов азота в этом диапазоне  $p$ ), вероятнее всего, связано с ростом концентрации остаточного кислорода в реакционной камере, такое поведение  $I$  предположительно можно связать с присутствием активных радикалов кислорода в азотсодержащей плазме.

Во-вторых, поскольку в разрядной камере кроме компонента аммиака присутствуют также компоненты всех

газов окружающей атмосферы, а также компоненты внутреннего обрамления камеры, то для установления физической природы полосы с  $h\nu_m = 3.42$  эВ был проведен дополнительный отжиг образцов GaN:Zn, в которых эта полоса уже существовала после отжига в ВЧ плазме аммиака и остаточных радикалов кислорода, при  $T_a = 750^\circ\text{C}$  и  $p = 10^{-3}$  мм рт.ст. (см. рис. 1, кривая 3) в радикалах именно кислорода (их концентрация на 4–6 порядков превышала концентрацию радикалов остаточного кислорода атмосферы в камере), полученных из чисто кислородной среды (ср. колонки 3 и 4 таблицы).

Анализ данных таблицы свидетельствует о том, что интенсивность полосы с  $h\nu_m = 3.42$  эВ после отжига в радикалах именно кислорода увеличивается приблизительно в 5 раз по сравнению с наблюдаемой в образцах, обработанных в радикалах остаточного кислорода. Следовательно, полоса ФЛ с  $h\nu = 3.42$  эВ обусловлена рекомбинацией свободных дырок с электронами, связанными на донорных центрах  $\text{O}_\text{N}$  (кислород на месте азота). Подтверждением этого факта является линейный ход зависимости  $I(L)$  ( $\alpha \approx 1$ ), характерный для переходов зона–примесь. О том, что кислород является хорошо внедряемой примесью в GaN, свидетельствуют также результаты работ [24,25]. Таким образом, вклад кислорода в формирование полосы ФЛ с  $h\nu_m = 3.42$  эВ с высокой вероятностью можно считать доказанным.

Незначительное уменьшение интенсивностей полос с  $h\nu = 2.88$  и  $3.27$  эВ после отжига в радикалах кислорода (см. таблицу) свидетельствует о том, что донорные свойства кислорода очень сложны. Кислород и его комплексы с другими дефектами могут создавать также центры безызлучательной рекомбинации, способствующие уменьшению эффективного времени жизни носителей заряда, которое в свою очередь приводит к падению интенсивностей всех без исключения полос ФЛ исследованных образцов после деструктурирующих обработок в кислородсодержащей среде. Рост интенсивности полосы ФЛ с  $h\nu = 3.42$  эВ на фоне падения  $I$  всех полос при этом связан с созданием (введением) дополнительных центров излучательной рекомбинации, которые создают предпосылки компенсации падения интенсивности, обусловленного введением центров безызлучательной рекомбинации.

#### 4. Заключение

Таким образом, экспериментальные исследования, проведенные в данной работе, свидетельствуют в пользу того, что полосы люминесценции с максимумами излучения вблизи 2.88, 3.48, 3.27 и 3.42 эВ являются не отличительной особенностью, обусловленной той или иной технологией, а скорее общим свойством пленок GaN, изготовленных с применением практически всех эпитаксиальных технологий (в том числе и при отжиге GaN в активных радикалах азота, полученных из ВЧ плазмы

аммиака). Их природа связана с простыми дефектами структуры GaN и их комплексами, которые образуются в процессе эпитаксиального роста и постэпитаксиальных технологических обработок и являются общими для всех технологий (остаточный кислород, углерод, вакансии и межузельные атомы азота и др.).

Работа выполнена при финансовой поддержке ДФФД Украины, проект 04.07/256.

#### Список литературы

- [1] S. Nakamura, M. Senoh, T. Mukai. Jap. J. Appl. Phys., **31**, L139 (1992).
- [2] J.C. Zolper, M. Hagerott, J. Grawtord, A.J. Howard, J. Ramer, S.D. Hersee. Appl. Phys. Lett., **68**, 200 (1996).
- [3] А.Н. Георгобиани, А.Н. Грузинцев, У.А. Аминов, М.О. Воробьев, И.И. Ходос. ФТП, **35**, 149 (2001).
- [4] Т.В. Бутхузи, А.Н. Георгобиани, Е. Заде-Улы, Б.Т. Эльтазарава, Т.Г. Хулордава. Тр. ФИАН, **182**, 140 (1987).
- [5] Г.А. Сукач, В.В. Кидалов, А.И. Власенко, М.Б. Котляревский, Е.П. Потапенко. Оптоэлектрон. и полупроводн. техн., **37**, 91 (2002).
- [6] Г.А. Сукач, Н.И. Сыпко, В.М. Гладаревский. Оптоэлектрон. и полупроводн. техн., **14**, 58 (1988).
- [7] У. Кайзер, А.Н. Грузинцев, И.И. Ходос, В. Рихтер. Неорг. матер., **6**, 458 (2000).
- [8] H. Amono, I. Akasaki, T. Kozawa, N. Sawaki, K. Ikeda. J. Luminesc., **4**, 121 (1988).
- [9] С.В. Свечников, П.Ф. Олексенко, Г.О. Сукач, П.С. Смертенко, С.И. Власкина, О.В. Бушма, А.Б. Богословська. УФЖ, **43**, 1290 (1998).
- [10] В.Ю. Некрасов, Л.В. Беляков, О.М. Сресели, Н.Н. Зиновьев. ФТП, **33**, 1428 (1999).
- [11] C.H. Hong, D. Pavidis, S.W. Brown. J. Appl. Phys., **74**, 1705 (1995).
- [12] G. Grimmeiss, B. Monemar. J. Appl. Phys., **41**, 4054 (1970).
- [13] R. Dingle, M. Ilegems. Sol. St. Commun., **9**, 175 (1971).
- [14] O. Langstrem, B. Monemar. J. Appl. Phys., **45**, 2266 (1974).
- [15] M. Ilegems, R. Dingle. J. Appl. Phys., **44**, 4234 (1973).
- [16] W. Gotz, N.M. Jonson, C. Chen, H. Liu, C. Kuo, W. Imler. Appl. Phys. Lett., **68**, 2666 (1996).
- [17] S. Strite, H. Morkoc. J. Vac. Sci. Technol. B, **10**, 1237 (1992).
- [18] S. Fischer, C. Wetzel, W.L. Hansen, E.D. Bourret-Courchesnes. Appl. Phys. Lett., **69**, 2716 (1996).
- [19] P.G. Middleton, K.P. O'Donnell, C. Trager-Cowan, D. Cole, M. Cazzanelli, J. Lunney. Mater. Sci. Eng., **B59**, 133 (1999).
- [20] K.P. O'Donnell, M. Umlauf, M. Kraushaar, H. Kalt, O. Briot. Mater. Sci. Eng., **B50**, 264 (1997).
- [21] G.B. Ren, D.J. Devsnp, D.E. Lacklison, J.W. Orton, T.S. Cheng, C.T. Foxon. Mater. Sci. Eng., **B43**, 242 (1997).
- [22] T.F. Huang, A. Marshall, S. Spruytte, J.S. Harris, Jr. J. Cryst. Growth., **200**, 362 (1999).
- [23] B.C. Chung, M. Gershenson. J. Appl. Phys. **72**, 651 (1992).
- [24] Ф.Ф. Греков, Д.М. Демидов, А.М. Зыков. ЖПХ, **52**, 1394 (1979).
- [25] С.Е. Александров, Т.А. Гаврикова, А.М. Зыков. ФТП, **34**, 297 (2000).

Редактор Л.В. Шаронова

## Defect luminescence of GaN:Zn films annealed in high-frequency ammonia plasma

G.A. Sukach, V.V. Kidalov\*, A.I. Vlasenko,  
E.P. Potapenko

Institute of Semiconductor Physics,  
National Academy of Sciences of Ukraine,  
03028 Kiev, Ukraine

\* Berdyansk State Pedagogical Institute,  
71118, Berdyansk, Ukraine

**Abstract** We have investigated the effect of annealing in nitrogen radicals (obtained by treatment of ammonia in high-frequency discharge) on luminescent properties of GaN:Zn films MOCVD-grown on (0001) sapphire substrates. As the annealing temperature increased, both the violet (2.88 eV) and near-edge (3.48 eV) photoluminescence bands displayed monotonous decrease. After annealing in nitrogen radicals at temperatures of 500–750°C, new bands (with peaks at 3.27 and 3.42 eV) were detected. Their intensities increased with the annealing temperature. A critical analysis of the mechanisms for occurrence and nature of all bands has been performed. It was found that the luminescence bands 2.88, 3.42 and 3.27 eV were characteristic of GaN films obtained by practically any technique, and related to simple structural defects. Participation of oxygen in formation of the band 3.42 eV has been experimentally proved.