

## Исследование методом электроотражения влияния $\gamma$ -облучения на оптические свойства эпитаксиальных пленок GaN

© А.Е. Беляев, Н.И. Клюй<sup>¶</sup>, Р.В. Конакова, А.Н. Лукьянов, Б.А. Данильченко\*, Ю.Н. Свешников<sup>+</sup>, А.Н. Клюй<sup>×</sup>

Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева Национальной академии наук Украины, 03028 Киев, Украина

\* Институт физики Национальной академии наук Украины, 03028 Киев, Украина

<sup>+</sup> ЗАО „Элма-Малахит“, Зеленоград, Россия

<sup>×</sup> Киевский национальный университет им. Т. Шевченко, 03022 Киев, Украина

(Получена 27 июля 2011 г. Принята к печати 16 августа 2011 г.)

Представлены результаты измерений спектров электроотражения образцов эпитаксиальных пленок GaN на сапфире, подверженных действию  $\gamma$ -облучения дозами  $10^5$ – $2 \cdot 10^6$  рад. Рассчитанные на основе модели 3 переходов теоретические спектры электроотражения с достаточной точностью совпадают с экспериментальными данными. Полученные в рамках модели величины энергий и уширений переходов дают основание полагать, что в пленках GaN существуют внутренние механические напряжения, значения которых меняются в зависимости от дозы  $\gamma$ -излучения.

### 1. Введение

Структуры на основе GaN являются перспективными для использования в силовой и высокочастотной микроэлектронике. Важным аспектом использования микроэлектронных приборов является их стойкость и стабильность работы в экстремальных условиях, в частности под действием повышенной радиации. Деградационные свойства структур на основе GaN под влиянием ионизирующего излучения до сих пор еще недостаточно изучены.

Известно, что при облучении образцов GaN высокоэнергетическими квантами — рентгеновскими или  $\gamma$ -лучами, протонами или нейтронами наблюдается увеличение количества радиационных дефектов, что увеличивает интенсивность безызлучательной рекомбинации [1], ведет к появлению дополнительных энергетических состояний дефектов с энергией ниже энергии зоны проводимости [2–4]. Количество дополнительных носителей заряда после  $\gamma$ -облучения увеличивается, а подвижность, наоборот, уменьшается [3]. Созданные во время облучения точечные дефекты влияют на электрические и оптические свойства GaN. В работах [5,6] показано, что благодаря появлению прыжкового механизма проводимости через радиационные дефекты, сформированные при увеличении дозы облучения нейтронами, происходит увеличение удельного сопротивления образцов GaN с последующим его уменьшением.

При этом невыясненным остается вопрос влияния радиации на энергетическую структуру GaN. Как известно, энергетическая щель в GaN со структурой типа вюрцита имеет спин-орбитальное расщепление с 2 дополнительными энергетическими подзонами, что установле-

но теоретически [5,7] и подтверждено экспериментально [5,8,9]. Информативным методом изучения зонной структуры полупроводников является метод электроотражения (ЭО) — разновидность метода модуляционной спектроскопии [10]. Методом ЭО удается с высокой точностью определять энергии прямых зона-зонных переходов ( $E_g$ ) и уширение соответствующих спектральных полос ( $\Gamma$ ). В свою очередь значения  $E_g$  зависят от величины и знака механических напряжений, а  $\Gamma$  — от структурного совершенства материала. Немаловажным также является тот факт, что при использовании так называемой „электролитической методики“ метод ЭО является фактически неразрушающим.

В данной работе методом электроотражения изучалось влияние  $\gamma$ -облучения на оптические и структурные свойства эпитаксиальных пленок GaN.

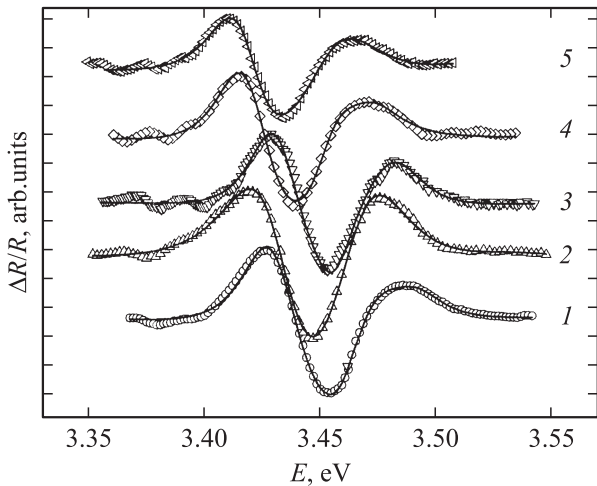
### 2. Эксперимент

Эпитаксиальные пленки *n*-GaN толщиной  $\sim 1$  мкм, легированные кремнием с концентрацией  $\sim (1-3) \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>, были выращены в ЗАО „Элма-Малахит“ (Россия) на поверхности (0001) подложек Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> методом МОС-гидридной эпитаксии (metal-organic chemical vapor deposition — МОСVD).

Образцы облучались  $\gamma$ -квантами до доз  $10^5$ ,  $5 \cdot 10^5$ ,  $10^6$ ,  $2 \cdot 10^6$  рад с использованием источника <sup>60</sup>Co с постепенным набором дозы. После каждой дозы измерялись спектры ЭО в диапазоне длин волн 350–380 нм (3.35–3.45 эВ) с разрешающей способностью  $\pm 0.001$  эВ.

Для измерения спектров ЭО использовалась автоматизированная установка на базе дифракционного спектрометра МДР-23. Омический контакт к GaN создавался напылением пленки титана толщиной 100 нм с последу-

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



**Рис. 1.** Спектры электроотражения пленок GaN до и после обработки  $\gamma$ -квантами: точки — экспериментальные данные, сплошные кривые — результаты подгонки по предложенной модели: 1 — исходный образец, 2 — после облучения дозой  $10^5$  рад, 3 — после облучения  $5 \cdot 10^5$  рад, 4 — после облучения  $10^6$  рад, 5 — после облучения  $2 \cdot 10^6$  рад.

ющим ее вжиганием при температуре  $700^\circ\text{C}$  и напылением пленки золота (100 нм). Вторым контактом служил электролитический раствор KCl в дистиллированной воде. Специальным образом смонтированные образцы помещались в электролитическую ячейку с платиновым электродом.

Как известно [8,11,12], в GaN с решеткой типа вюрцита существует спин-орбитальное расщепление валентной зоны вблизи края поглощения в точке  $\Gamma$  зоны Бриллюэна, благодаря чему сигнал ЭО формируют 3 основных перехода, которые обычно обозначают А, В и С. Поэтому для интерпретации спектров была использована модель ЭО с тремя прямыми переходами [10,13]:

$$\frac{\Delta R}{R}(E) = R_0 + \text{Re} \left[ \sum_{k=1}^3 C_k e^{i\theta_k} (E - E_{gk} + i\Gamma_k)^{-2} \right], \quad (1)$$

где  $R_0$  — постоянная;  $E_{gk}$  — энергии переходов;  $\Gamma_k$  — уширение переходов;  $C_k$  — интенсивности переходов;  $\theta_k$  — фазовые коэффициенты;  $k = 1, 2, 3$  — переходы А, В, С соответственно. Параметры переходов определялись в результате подгонки теоретических спектров к экспериментальным по формуле (1).

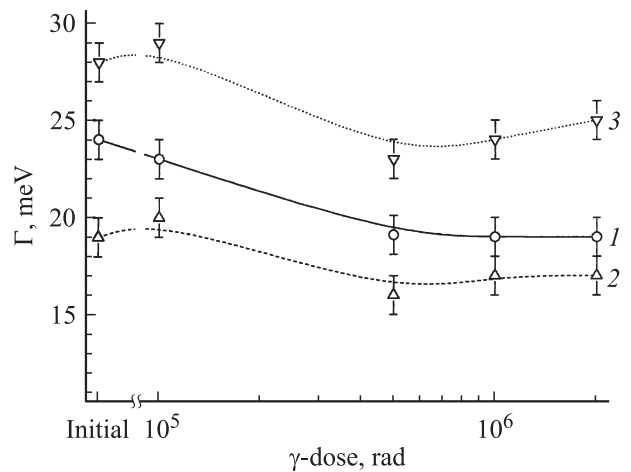
Результаты теоретического моделирования показаны на рис. 1 сплошными кривыми.

### 3. Результаты и обсуждение

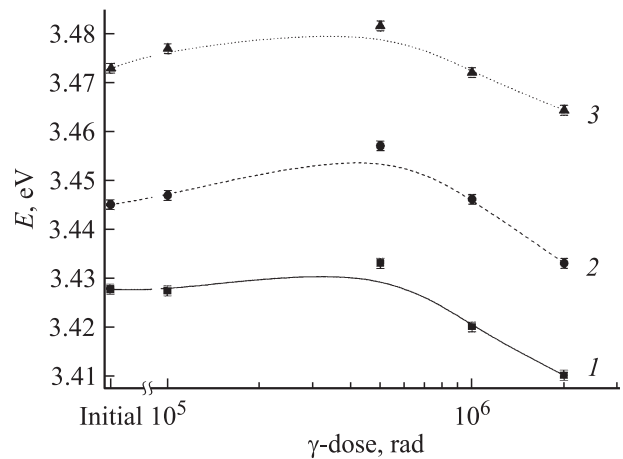
Экспериментальные спектры ЭО пленок GaN и результаты теоретического моделирования представлены на рис. 1. Определенные по полученным спектрам значения энергии переходов и их уширения представлены на

рис. 2, 3. Наблюдаемые в спектрах ЭО на рис. 1 осцилляции в длинноволновой области спектра ( $E < 3.40$  эВ) обусловлены линейным электрооптическим откликом эпитаксиальной пленки GaN аналогично тому, как это наблюдалось в работе [14].

Как видно из рис. 2, при малых дозах  $\gamma$ -облучения уширение переходов В и С увеличивается, тогда как перехода А практически не изменяется в пределах погрешности эксперимента. Это можно объяснить образованием под действием радиации новых точечных дефектов. При этом количество дефектов увеличивается до определенного уровня в достаточно структурно-совершенных пленках GaN при дозах облучения  $10^5$  рад. При дальнейшем увеличении дозы облучения до  $5 \cdot 10^5$  рад происходит уменьшение уширения всех переходов. Данный эффект обусловлен уменьшением рассеяния возбужденных светом носителей заряда на несовершенствах исследуемого приповерхностного слоя GaN. Время энергетической релаксации возбужденных светом носителей заряда



**Рис. 2.** Зависимости параметра уширения прямых переходов от дозы  $\gamma$ -облучения: 1, 2, 3 — переходы А, В, С соответственно.



**Рис. 3.** Зависимости энергий прямых переходов от дозы  $\gamma$ -облучения: 1, 2, 3 — переходы А, В, С соответственно.

можно определить как  $\tau \propto \hbar/\Gamma$ , где  $\Gamma$  — параметр уширения перехода. Их подвижность также обратно пропорциональна величине параметра  $\Gamma$ , т.е. при уменьшении  $\Gamma$  растет подвижность носителей заряда. Отметим, что в работе [15] радиационно-стимулированное увеличение холловской подвижности электронов в гетероструктурах AlGaIn/GaN наблюдалось в том же диапазоне доз  $\gamma$ -облучения от источника  $^{60}\text{Co}$ , что и в данной работе. Такое поведение можно объяснить эффектом „малых доз“, когда происходит аннигиляция радиационных точечных дефектов, генерированных  $\gamma$ -облучением, и дефектов, которые уже существуют в пленке.

Введение новых точечных дефектов также служит причиной определенного увеличения энергий всех переходов при увеличении дозы облучения до  $5 \cdot 10^5$  рад (рис. 3). Увеличение энергий переходов может свидетельствовать об увеличении в пленке уровня внутренних механических напряжений сжатия. Такой вывод можно сделать на основании результатов работ [16,17], в которых были выполнены исследования температурной зависимости энергий переходов А, В, С для пленки, свободной от подложки („freestanding film“). Логично предположить, что в этом случае напряжения в пленке имеют возможность релаксировать и соответствующие значения энергий переходов могут рассматриваться как своего рода эталонные для соответствующих температур измерений. Определенные из соответствующих температурных зависимостей [16] энергии переходов при 300 К (при которой производились наши измерения) составляли  $E_A = 3.423$  эВ,  $E_B = 3.435$  и  $E_C = 3.473$  эВ соответственно. Как видно из рис. 3 эти значения заметно ниже полученных нами величин для необлученной пленки, как уже отмечалось выше, может свидетельствовать о наличии в ней внутренних механических напряжений сжатия. Дальнейшее увеличение дозы облучения и накопление структурных дефектов в пленке приводит к увеличению уширения переходов (рис. 2) и к релаксации внутренних механических напряжений сжатия, что обусловлено генерацией дефектов в плазме при дозах облучения  $10^6 - 2 \cdot 10^6$  рад (рис. 2, 3). Используя полученные в [18] зависимости энергии переходов А, В, С от величины биаксиального напряжения в плоскости эпитаксиального слоя и полагая, что наклон соответствующих линейных зависимостей не зависит от температуры измерения (в [18] измерения выполнялись при температуре  $T < 10$  К), мы можем определить соответствующие коэффициенты. Они составляют 1.38, 1.69 и 2.62 мэВ/кбар для переходов А, В и С соответственно. Тогда для необлученных эпитаксиальных пленок GaN, выращенных на сапфировой подложке, напряжения сжатия, определенные с использованием соответствующих коэффициентов из энергий переходов В и С, близки по значению и составляют 5.92 и 6.49 кбар соответственно. Значение напряжения, определенные из энергии перехода А, несколько ниже и составляет 3.62 кбар. Отметим также, что определенные в работе [17] при  $T = 300$  К значения уширений переходов А и В близки к получен-

ными нами значениям. Таким образом, метод ЭО является чувствительным к наличию в пленке GaN структурных дефектов и внутренних механических напряжений и может использоваться для неразрушающего контроля качества пленок.

#### 4. Заключение

Методом электроотражения показано, что при облучении эпитаксиальных пленок GaN  $\gamma$ -квантами наблюдается эффект „малых доз“, который сопровождается уменьшением уширения переходов и, следовательно, структурным упорядочением приповерхностного слоя пленки. При этом также имеет место уменьшение уровня внутренних механических напряжений растяжения. Дальнейшее увеличение дозы облучения вызывает разупорядочение пленки и рост внутренних механических напряжений сжатия, а при достижении доз  $10^6 - 2 \cdot 10^6$  рад их частичную релаксацию.

#### Список литературы

- [1] E. Gaubas, P. Pobedinskas, J. Vaitkus, A. Uleckas, A. Zukauskas, A. Blue, Ruhman, K.M. Smith, E. Aujol, B. Beaumont, J.-P. Faurie, P. Gibart. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A, **552**, P. 82 (2005).
- [2] V.V. Emtseva, V.Yu. Davydova, V.V. Kozlovskii, G.A. Oganeyana, D.S. Poloskina, A.N. Smirnova, E.A. Troppa, Yu.G. Morozov. Physica B, **401–402**, 315 (2007).
- [3] V.V. Emtsev, V.Yu. Davydov, V.V. Kozlovskii, V.V. Lundin, D.S. Poloskin, A.N. Smirnov, N.M. Schmidt, A.S. Usikov, J. Aderhold, H. Klausling, D. Mistele, T. Rotter. J. Stemmer, O. Semchinova, J. Graul. Semicond. Sci. Technol., **15**, 73 (2000).
- [4] A. Castaldini, A. Cavallini, L. Potenta. J. Phys.: Condens. Matter, **12**, 10 161 (2000).
- [5] M. Julier, J. Campo, B. Gil, J. Lascaray, S. Nakamura. Phys. Rev. B, **57** (12), R6791 (1998).
- [6] В.Г. Бойко, С.С. Веревкин, Н.Г. Колин, А.В. Корулин, Д.И. Меркурисов, А.Я. Поляков, В.А. Чевычелов. ФТП, **45** (1), 136 (2011).
- [7] Kwiseon Kim, Walter R.L. Lambrecht, Benjamin Segall, Mark van Schilfgaarde. Phys. Rev. B, **56** (12), 7363 (1997).
- [8] V.P. Makhniy, M.M. Slyotov, V.V. Gorley, P.P. Horley, Yu.V. Vorobiev, J. Gonzalez-Hernandez. Appl. Surf. Sci., **253**, 246 (2006).
- [9] K.P. Korona, A. Wyszomolek, K. Pakula, R. Stepniewski, J.M. Baranowski, I. Grzegory, B. Lucznik, M. Wroblewski, S. Porowski. Appl. Phys. Lett., **69** (6). 788 (1996).
- [10] В.А. Тягай, О.В. Снитко. *Электроотражение света в полупроводниках* (Киев, Наук. думка, 1980).
- [11] R. Kudrawiec. M. Syperek, J. Misiewicz, R. Paszkiewicz, B. Paszkiewicz, M. Tlaczala. Superlat. Microstr., **36**, 643 (2004).
- [12] S.F. Chichibua, K. Torri, T. Deguchi, T. Sota, A. Setoguchi, H. Nakanishi, T. Azuhata, S. Nakamura. Appl. Phys. Lett., **76** (12), 1576 (2000).
- [13] C.F. Li, Y.S. Huang, L. Malikova, F.H. Pollak. Phys. Rev. B, **55** (15), 9251 (1997).

- [14] S. Shokhovets, R. Goldhahn, G. Gobsch. Mater. Sci. Eng. B, **93**, 215 (2002).
- [15] A.V. Kurakin, S.A. Vitusevich, S.V. Danylyuk, H. Hardtdegen, N. Klein, Z. Bougriouva, B.A. Danilchenko, R.V. Konakova, A.E. Belyaev. J. Appl. Phys., **103**, 083 707 (2008).
- [16] Y.S. Huang, Fred H. Pollak, S.S. Park, K.Y. Lee, H. Morkoc. J. Appl. Phys., **94** (2). 899 (2003).
- [17] C.F. Li, Y.S. Huang, L. Malikova, F.H. Pollak. Phys. Rev. B, **55** (15), 9251 (1997).
- [18] B. Gil, O. Briot, R.-L. Aulombard. Phys. Rev. B, **52** (24), R17028 (1995).

*Редактор Т.А. Полянская*

### **The electroreflectance study of the effect of gamma irradiation on the optical properties of epitaxial GaN films**

*A.E. Belyaev, N.I. Klyui, R.V. Konakova, A.N. Lukyanov, B.A. Danilchenko\*, J.N. Sveshnikov+, A.N. Klyui×*

Lashkarov Institute of Semiconductor Physics  
of National Academy of Sciences of Ukraine  
03028 Kyiv, Ukraine

\* Institute of Physics,

National Academy of Sciences of Ukraine,  
03028 Kyiv, Ukraine

+ ZAO „Elma Malachite“,

Zelenograd, Russia

× Taras Shevchenko Kyiv National University,  
03022 Kiev, Ukraine

**Abstract** In this study the results of electroreflectance spectra measurements of epitaxial GaN films on sapphire samples exposed to  $\gamma$ -radiation doses of  $10^5$ – $2 \cdot 10^6$  rad were presented. Calculation of electroreflectance spectra based on the theoretical model of 3 transitions are coincided with the experimental data with sufficient accuracy. The obtained in the framework of the model values of energy and broadening of the transitions led us to suppose that the GaN films have internal mechanical stresses, whose values vary depending on the dose of  $\gamma$ -rays.