

Влияние отжига на оптические и структурные свойства GaN:Er

© Н.А. Соболев, А.М. Емельянов*, В.В. Лундин, В.И. Сахаров, И.Т. Серенков, А.С. Усиков

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

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

(Получена 12 января 1999 г. Принята к печати 13 января 1999 г.)

Исследовано влияние отжига на оптические и структурные свойства слоев нитрида галлия, выращенных методом газофазного осаждения из металлоорганических соединений и имплантированных ионами эрбия с энергиями 0.8–2.0 МэВ и дозами $(1-4) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$. В некоторые образцы проводилась дополнительная имплантация ионов кислорода с энергиями 0.11–0.28 МэВ и дозами $(1-4) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Методом обратного резерфордовского рассеяния протонов показано, что при исследованных дозах имплантации ионов эрбия не происходит аморфизации слоев нитрида галлия. Формирование эрбиевых люминесцентных центров, излучающих на длине волны 1.54 мкм, в процессе постимплантационного отжига в диапазоне температур 700–1300°C заканчивается раньше, чем восстанавливается дефектная структура имплантированных слоев.

Интерес к исследованию люминесценции ионов эрбия в полупроводниках обусловлен перспективами их применения в оптоэлектронике. Для лучшего понимания процессов дефектообразования и люминесценции ионов Er^{3+} исследуются различные полупроводники, начиная с кремния и кончая нитридом галлия. При этом температурная закалка интенсивности фотолюминесценции (ФЛ) ионов эрбия существенно уменьшается при увеличении ширины запрещенной зоны полупроводника. Так, в Si:Er интенсивность ФЛ ионов эрбия при увеличении температуры измерения от жидкого азота до комнатной температуры уменьшается на несколько порядков [1], в то время как в GaN:Er наблюдается уменьшение интенсивности всего в несколько раз [2]. Вопрос же поведения структурных дефектов в GaN:Er изучен явно недостаточно. Цель настоящей работы заключалась в исследовании влияния условий постимплантационного отжига на оптические и структурные свойства слоев нитрида галлия, легированных эрбием.

Экспериментальные условия

Нелегированные пленки GaN *n*-типа проводимости с концентрацией носителей заряда $n \sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и толщиной 1.2 мкм выращивались на (0001) сапфировых подложках методом газофазного осаждения из металлоорганических соединений (MOCVD). Процедура роста подробно описана в [2]. Ионы эрбия с энергиями $E = 0.8-2.0 \text{ МэВ}$ и дозами $D = (1-4) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ и кислорода с $E = 0.11-0.28 \text{ МэВ}$ и $D = (1-4) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ имплантировались при комнатной температуре. Энергии ионов кислорода выбирались такими, чтобы их процированные пробеги совпадали с соответствующими значениями для ионов эрбия. Имплантированные образцы отжигались в печи для быстрого термического отжига при $T_0 = 700-1300^\circ\text{C}$ в течение времени $t = 15-1800 \text{ с}$ в потоке азота. Время разогрева образцов до заданной температуры было много меньше длительности отжига.

ФЛ возбуждалась излучением галогеновой лампы. Мощность излучения, сфокусированного линзовой си-

стемой на образце, составляла $\sim 50 \text{ мВт}$. Для регистрации сигнала ФЛ использовался InGaAs-фотоприемник, работающий при комнатной температуре. Световой поток от галогеновой лампы модулировался прерывателем с частотой 18 Гц. Импульсы фототока приемника преобразовывались в переменное напряжение, которое регистрировалось с помощью селективного вольтметра. Разрешение системы $\sim 3 \text{ нм}$. Кристаллическая структура имплантированных слоев исследовалась методом обратного резерфордовского рассеяния (RBS) протонов с энергией 230 кэВ, рассеянных на угол 120° .

Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены измеренные при 300 и 80 К спектры ФЛ образца GaN имплантированного ионами эрбия с несколькими энергиями $E = 2, 1.6, 1.2 \text{ и } 0.8 \text{ МэВ}$ и парциальными дозами $1 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ и отожженного при 1300°C в течение 360 с. Расчетные величины процированного пробега ионов составляют соответственно 0.5, 0.4, 0.3 и 0.2 мкм. Наиболее интенсивный пик излучения с максимумом на длине волны $\lambda = 1.538 \text{ мкм}$ обусловлен переходами электронов с первого возбужденного состояния $^4I_{13/2}$ на основной уровень $^4I_{15/2}$ ионов Er^{3+} . Широкая полоса излучения в области $\lambda \sim 1-1.4 \text{ мкм}$ с максимумом при $\lambda = 1.17 \text{ мкм}$ связана с ФЛ дефектов в GaN, поскольку наблюдается как после имплантации ионов эрбия, так и неодима [3] или хрома [4]. Ряд небольших пиков вблизи $\lambda \sim 1 \text{ мкм}$, по-видимому, обусловлен переходами электронов из второго возбужденного состояния $^4I_{11/2}$ иона Er^{3+} в основное состояние $^4I_{15/2}$ [2]. Отметим, что нами не зарегистрировано значительных различий в характере спектров ФЛ образцов GaN:Er и GaN:Er:O. Для представленного на рис. 1 образца интенсивность ФЛ на $\lambda = 1.538 \text{ мкм}$ увеличивалась в 2.2 раза при понижении температуры измерения от 300 до 80 К. Интенсивность сигнала ФЛ в максимуме полосы от дефектов при охлаждении от 300 до 80 К увеличивалась более чем в 2 раза.

Интенсивность ФЛ Er^{3+} на $\lambda = 1.538 \text{ мкм}$ при увеличении температуры изохронного (в течение 15 с) отжига в диапазоне $700\text{--}1300^\circ\text{C}$ монотонно нарастает, достигая десятикратного увеличения при 1300°C отжиге по сравнению с 700°C отжигом. Наиболее сильный рост наблюдается при $T_0 > 900^\circ\text{C}$. Излучение от дефектов сильно нарастает при $T_0 > 1100^\circ\text{C}$ и увеличивается по мере роста продолжительности отжига. Интенсивность же эрбиевой ФЛ в GaN:Er при $T_0 = 1300^\circ\text{C}$ практически не увеличивается при увеличении времени отжига от 15 до 400 с. В то же время интенсивность связанной с дефектами полосы нарастает.

На рис. 2 приведены RBS-спектры протонов для образца GaN:Er:O. Спектры 1, 2 и 3 измерены в режиме каналирования вдоль оси $\langle 0001 \rangle$ исследованных монокристаллов, спектр 4 — в неориентированном ("случайном") режиме. Кривая 1 представляет собой каналовой спектр для выращенного слоя перед имплантацией и практически соответствует сигналу для идеального монокристалла GaN. Для этого образца относительный выход рассеяния протонов χ_{\min} (отношение отсчетов в каналирующем и случайном режимах для каналов за поверхностным пиком: 286–315 каналы) составляет ~ 0.015 , что близко к теоретическим величинам для совершенного монокристалла. Полученный в режиме каналирования RBS-спектр после имплантации ионов эрбия и кислорода представлен кривой 3. Можно отметить, что имплантация кислорода практически не оказывает влияния на RBS-спектр. Кривая 2 представляет собой спектр для того же образца после отжига при 900°C в течение 30 мин.

Распределения собственных точечных дефектов (смещенных в межузельные положения атомов галлия и азота) по глубине образца были рассчитаны из кривых 2

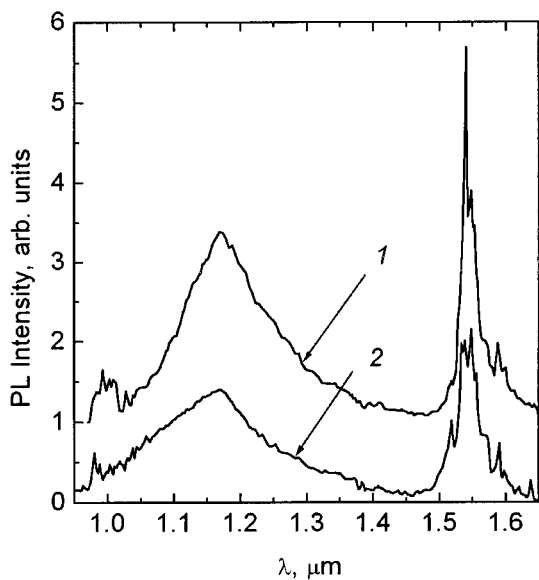


Рис. 1. Спектр фотолуминесценции образца GaN:Er после отжига при температуре 1300°C в течение 360 с, измеренный при 80 (1) и 300 К (2). Для удобства кривая 1 смещена вверх на 1 отн. ед.

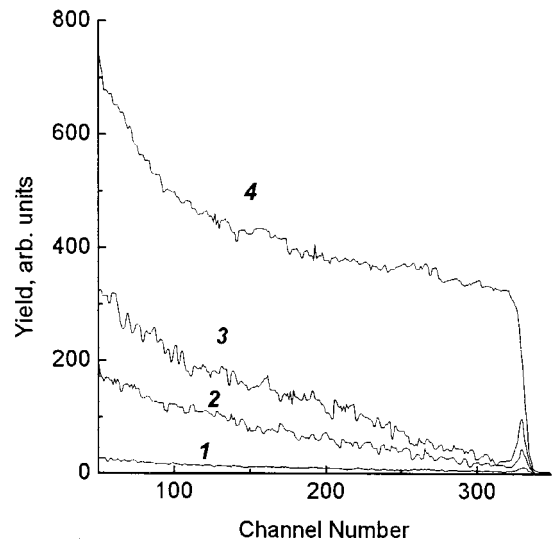


Рис. 2. RBS-спектр протонов для того же образца, что на рис. 1: до имплантации (1, 4), после имплантации (3) и после отжига при 900°C в течение 1800 с (2). Спектры измерены при каналирующем (1–3) и неориентированном (4) положениях образца.

и 3 на рис. 2 в рамках модели [5,6]. Относительные концентрации дефектов в максимумах их распределений равны 0.17 после имплантации и 0.08 после отжига. Интересно отметить, что в случае имплантации ионов эрбия с такими же энергиями в кремний полная аморфизация поверхностного слоя наступает уже при дозе имплантации $\text{Er } 1 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ [7]. Иными словами, при одинаковых дозе и энергии ионов эрбия степень повреждения кристаллической решетки слоев нитрида галлия значительно меньше, чем в кремнии.

Отношение величин χ_{\min} для образца GaN:Er:O после отжига к таковой для исходного монокристалла составляет ~ 3.5 . В то же время в кремнии при тех же условиях имплантации и отжига значение χ_{\min} практически совпадает со значением в исходном образце перед имплантацией, т.е. дефектная структура кремния полностью восстанавливается в процессе постимплантационного отжига.

Таким образом, установлено, что формирование оптически активных эрбийсодержащих центров во время постимплантационного отжига происходит значительно быстрее, чем восстановление дефектной структуры имплантированных эрбием образцов нитрида галлия. Накопление радиационных нарушений в процессе имплантации и их удаление во время отжига в слоях GaN:Er происходит существенно медленнее, чем в Si:Er.

Авторы выражают благодарность Е.О. Паршину за проведение процесса имплантации.

Работа выполнена при частичной поддержке INTAS-РФФИ (грант 95-0531).

Список литературы

- [1] J. Michel, J.L. Benton, R.F. Ferrante, D.C. Jacobson, D.J. Eaglesham, E.A. Fitzgerald, Y.-H. Xie, J.M. Poate, L.C. Kimerling. *J. Appl. Phys.*, **70**, 2672 (1991).
- [2] В.Ю. Давыдов, В.В. Лундин, А.Н. Смирнов, Н.А. Соболев, А.С. Усиков, А.М. Емельянов, М.И. Маковийчук, Е.О. Паршин. *ФТП*, **33**, 3 (1999).
- [3] E. Silkowski, Y.K. Yeo, R.L. Hengehold, B. Goldenberg, G.S. Pomrenke. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, **422**, 69 (1996).
- [4] S. Kim, S.J. Rhee, D.A. Turnbull, E.E. Reuter, X. Li, J.J. Coleman, S.G. Bishop. *Appl. Phys. Lett.*, **71**, 231 (1997).
- [5] E. Vogh. *Canad. J. of Phys.*, **46**, 653 (1968).
- [6] Ф.Ф. Комаров, М.А. Кумахов, И.С. Ташлыкков. *Неразрушающий анализ поверхностей твердых тел ионными пучками* (Минск, Изд-во БГУ, 1987) с. 108.
- [7] Р.Н. Кютт, Н.А. Соболев. *ФТП*, **39**, 853 (1997).

Редактор В.В. Чалдышев

Effect of annealing on optical and structural properties of GaN : Er

N.A. Sobolev, A.M. Emel'yanov*, V.V. Lundin, V.I. Sakharov, I.T. Serenkov, A.S. Usikov

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

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

Abstract Effect of annealing on optical and structural properties of gallium nitride layers grown by metal organic chemical vapor deposition and implanted with erbium ions at 0.8–2.0 MeV energies and $(1-4) \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ doses has been studied. Additional implantation of oxygen ions at 0.11–0.28 MeV energies and $(1-4) \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ doses was performed into some samples. The Rutherford back scattering of protons shows that the implantation does not lead to the amorphization of the layers. During the postimplantation annealing in a temperature range of 700–1300°C, the formation of erbium-related luminescence centers emitting at 1.54 μm wavelength stops earlier than the defect structure of the implanted layers restores.

Fax: (812) 247 1017 (N.A. Sobolev)

E-mail: nick@sobolev.ioffe.rssi.ru