

Оптические свойства пленок GaN/Al₂O₃, легированных кремнием

© Н.С. Заяц, П.А. Генцарь[†], В.Г. Бойко, О.С. Литвин,
Н.В. Вуйчик, А.В. Стронский, И.Б. Янчук

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

(Получена 30 июля 2008 г. Принята к печати 2 сентября 2008 г.)

Проведены морфологические и оптические исследования пленок GaN, легированных кремнием (уровень легирования $N_{Si} = 1.5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$), выращенных методом газовой эпитаксии из металлоорганических соединений на подложках из сапфира, ориентированных по кристаллографической оси c . Для выращенных пленок GaN получены следующие физические параметры: энергия электронного перехода E_0 , коэффициент поглощения α , показатель преломления n , частоты поперечных и продольных оптических колебаний решетки, характерные для кристаллических пленок GaN.

PACS: 61.72.Vv, 81.15.Gh, 78.20.Ci, 78.30.Fs

1. Введение

В связи с интенсивным использованием широкозонных полупроводников для создания оптоэлектронных приборов, таких как светодиоды, лазеры, фотоприемники ультрафиолетовой и видимой областей спектра [1–3], целесообразно дальнейшее исследование этих материалов. Нитрид галлия (GaN) имеет ширину запрещенной зоны, которая значительно больше по сравнению с германием, кремнием, арсенидом галлия, фосфидом галлия, карбидом кремния [4]. Кроме того, GaN имеет высокие значения критического электрического поля пробоя, большую радиационную стойкость, механическую прочность, является термостойким и химически инертным материалом. На его основе создают световые приборы для видимой области спектра (светодиоды на основе GaN излучают все цвета видимого диапазона, включая и белый). Сильная ионно-ковалентная связь, большая ширина запрещенной зоны при прямом расположении зон в пространстве квазимульсов определяют его оптические и люминесцентные свойства.

Одним из способов управления излучающими свойствами приборов на основе GaN является легирование тонких эпитаксиальных пленок, поэтому изучение влияния легирования на оптические свойства пленок остается актуальным и в настоящее время [5,6].

Для получения информации о структурных, электронных и оптических свойствах слоев GaN широко и успешно используются атомно-силовая микроскопия, а также инфракрасная (ИК) спектроскопия и комбинационное рассеяние света.

В данной работе проведены исследования морфологии поверхности, спектров пропускания в области фундаментального края поглощения GaN, спектров отражения в видимой и ИК областях, спектров комбинационного рассеяния света пленок GaN/Al₂O₃, легированных кремнием (уровень легирования $N_{Si} = 1.5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$).

[†] E-mail: gentsar@isp.kiev.ua

2. Методика эксперимента

Рост эпитаксиальных пленок GaN был осуществлен методом газовой эпитаксии из металлоорганических соединений. В качестве подложки были выбраны кристаллы сапфира (Al₂O₃), ориентированные по кристаллографической оси c . Пленки GaN выращивались при температуре 950°C и при этом легировались кремнием в процессе эпитаксии до концентрации $N_{Si} = 1.5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Толщина пленок контролировалась при помощи интерферометра МИИ-4 и составляла от 2 до 2.5 мкм в зависимости от образца.

Морфология поверхности пленок GaN исследовалась на атомно-силовом микроскопе (АСМ) Nanoscope IIIa Dimension 3000 (Digital Instruments, США) в режиме периодического контакта. Измерения проводились в центральной зоне образца с использованием серийных кремниевых зондов TESP с номинальным радиусом закругления острия до 10 нм (Veeco.JTC).

Пропускание пленок GaN, легированных кремнием, в области края фундаментального поглощения GaN и отражение в видимой области измерены при помощи дифракционного решеточного монохроматора МДР-23, а отражение в диапазоне 1.4–25 мкм на инфракрасном фурье-спектрометре „Perkin Elmer“ Spertrum BXII.

Спектры комбинационного рассеяния света (КРС) пленок GaN/Al₂O₃ регистрировались при помощи двойного монохроматора ДФС-24 и охлаждаемого фотоэлектронного умножителя, работающего в режиме счета фотонов. Для возбуждения спектров комбинационного рассеяния света использован твердотельный лазер с диодной накачкой и длиной волны излучения 532 нм. Разрешение при измерении спектров КРС составляло $\sim 1 \text{ см}^{-1}$.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведены изображения поверхности эпитаксиальной пленки GaN и профиль сечения, полученные с помощью атомно-силовой микроскопии, для

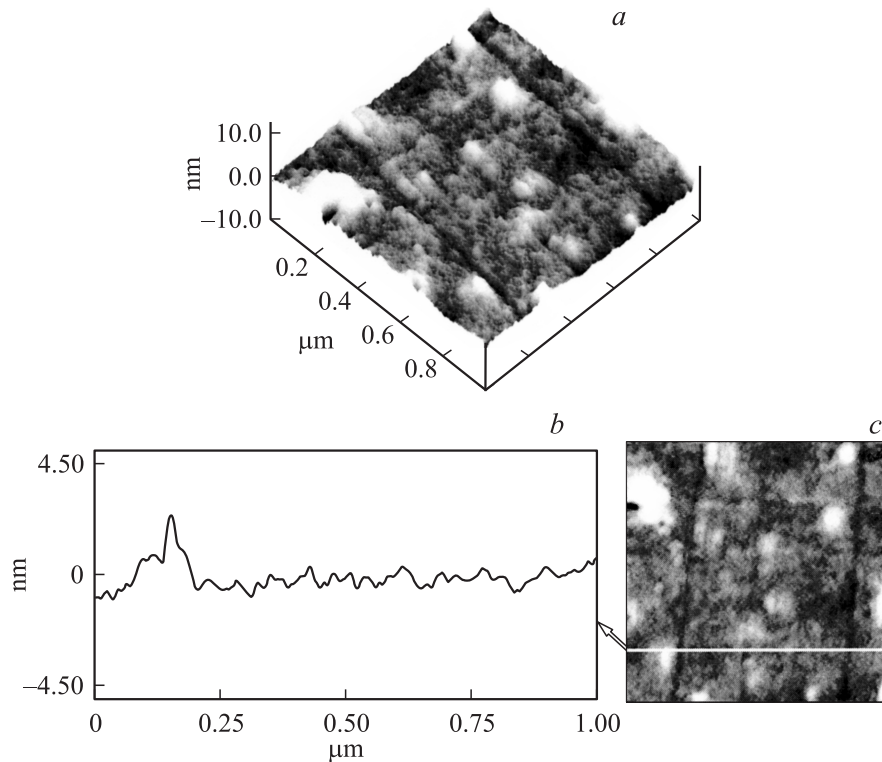


Рис. 1. Трехмерное изображение поверхности (а), профиль сечения (b) по прямой на двумерном изображении поверхности (с) эпитаксиальной пленки GaN на подложке Al₂O₃.

образца с толщиной пленки 2.2 мкм. Результаты получены для центральной области образца на площадке с размерами 1.5×2.5 мкм. Из морфологических исследований было получено, что среднеарифметическое и среднеквадратичное отклонения высот поверхности пленки равны 0.47 и 0.68 нм соответственно. При этом максимальный разброс высоты пленки по поверхности подложки составляет ~ 6.8 нм. Таким образом, можно сделать вывод, что поверхность эпитаксиальной пленки GaN гладкая.

Для определения оптических параметров эпитаксиальной пленки GaN были проведены исследования спектров пропускания и отражения. На рис. 2, а показан спектр пропускания пленки GaN в области собственного поглощения GaN. Из эксперимента следует, что ширина запрещенной зоны пленки GaN при комнатной температуре равна 3.44 эВ. Кроме того, в спектре наблюдается интерференционная картина в области ниже энергии края собственного поглощения.

В диапазоне 350–380 нм (область собственного поглощения GaN) была построена зависимость оптической плотности $D = \alpha d$ (d — толщина пленки) от длины волны (рис. 2, б), которая дала нам возможность определить коэффициент поглощения α пленки GaN. Расчеты показали, что в этой области $\alpha = 1.8 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$.

Интерференционная картина отражения в видимой области спектра (рис. 3) позволяет определить показатель

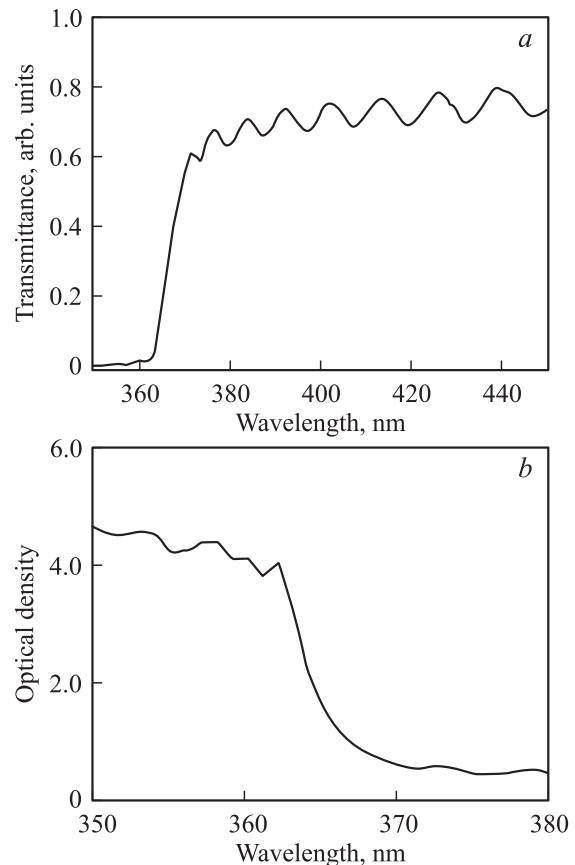


Рис. 2. Спектр пропускания (а) и спектр оптической плотности (б) пленки GaN/Al₂O₃ в области собственного поглощения.

преломления пленки GaN по формуле

$$n = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2d(\lambda_2 - \lambda_1)},$$

где λ_1 и λ_2 — длины волн, при которых наблюдаются соседние минимумы или максимумы, d — толщина пленки. Формула применима в пренебрежении дисперсией показателя преломления n в интервале длин волн λ_1 и λ_2 . Из рис. 3 следует, что в диапазоне между соседними минимумами $\lambda_1 = 607$ нм и $\lambda_2 = 644$ нм показатель преломления n пленки GaN равен 2.4 (при толщине пленки 2.2 мкм).

На рис. 4 приведен спектр отражения эпитаксиальной пленки GaN/Al₂O₃, легированной кремнием, толщиной 2.2 мкм в инфракрасной области спектра 1.4–25 мкм. В области частот выше 1500 см⁻¹ (длины волн до ~ 7 мкм) наблюдается интерференционная картина, обусловленная пленкой GaN и поверхностью подложки. В области 1500–400 см⁻¹ регистрируются полосы отражения сапфира и пленки. Можно видеть полосы колебаний решетки пленки GaN на частотах 534 и 745 см⁻¹. Согласно литературным данным [7,8], полоса при 534 см⁻¹ соответствует моде поперечных оптических фононов A₁(TO) симметрии Г₁, а полоса при 745 см⁻¹ соответствует моде продольных оптиче-

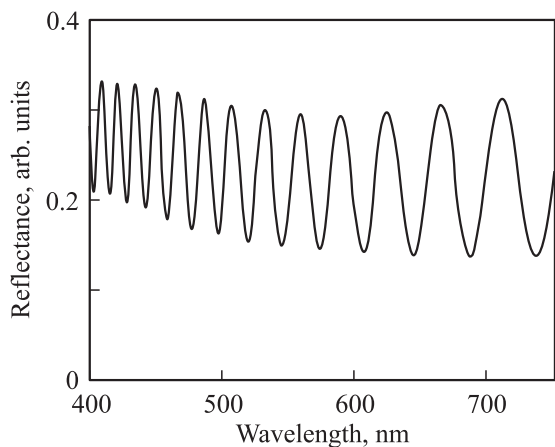


Рис. 3. Спектр отражения пленки GaN/Al₂O₃ в видимой области.

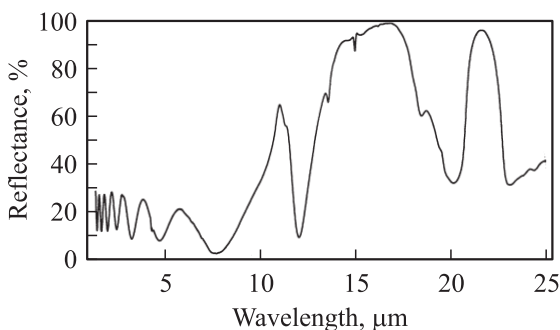


Рис. 4. Спектр ИК отражения пленки GaN/Al₂O₃ при 300 К.

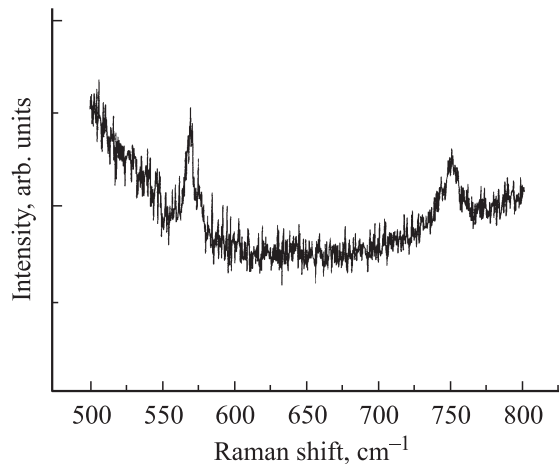


Рис. 5. Спектр комбинационного рассеяния света пленки GaN/Al₂O₃. Длина волны возбуждающего излучения 532 нм.

ских фононов A₁(LO) в легированной структуре той же симметрии.

Как известно, идеальный кристалл GaN имеет гексагональную структуру вюрцита (пространственная группа симметрии C_{6v}⁴) [4,7,9]. В спектрах КРС активными являются моды A₁(Z), E₁(X, Y) и E₂, а B-моды в спектрах не проявляются. В нашем случае в спектре КРС (рис. 5) проявились два пика с частотами 569 и 750 см⁻¹. К тому же, как видно из рис. 5, пик с частотой 569 см⁻¹ является несимметричным. Это может означать, что вклад в этот колебательный спектр дают как фононы поверхности эпитаксиальной пленки GaN (E₂-мода), так и фононы границы эпитаксиальная пленка–подложка (частоты равны 568 и 569 см⁻¹ соответственно) [7]. Второй наблюдаемый пик на частоте 750 см⁻¹ можно было бы отнести к E₁(LO)-моды симметрии Г₅, частота которой в объемной GaN составляет 743 см⁻¹. Однако имеется другое объяснение: эпитаксиальные пленки GaN в процессе роста были легированы кремнием, и так как при увеличении концентрации свободных носителей частота A₁(LO)-моды возрастает, это приводит к смещению полосы, соответствующей A₁(LO)-моды симметрии Г₁, в высокочастотную сторону [8].

Как следствие, из спектров ИК отражения и КРС можно сделать вывод, что выращенные методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений эпитаксиальные пленки GaN на Al₂O₃, легированные кремнием (N_{Si} = 1.5 · 10¹⁹ см⁻³), имеют гексагональную структуру вюрцита симметрии Г₁.

4. Заключение

Таким образом, экспериментально получены параметры пленок GaN/Al₂O₃, легированных кремнием (N_{Si} = 1.5 · 10¹⁹ см⁻³): ширина запрещенной зоны E₀ = 3.44 эВ, коэффициент поглощения при энергии 3.44 эВ α = 1.8 · 10⁴ см⁻¹, показатель преломления в

интервале длин волн 607–644 нм $n = 2.4$. Пики ИК отражения на частотах 534 и 745 см^{-1} , пики комбинационного рассеяния света при 569 и 750 см^{-1} свидетельствуют о монокристаллической структуре пленок, а именно о гексагональной структуре вюрцита симметрии Γ_1 .

Список литературы

- [1] Ю.Г. Шретер, Ю.Т. Ребане, В.А. Зыков, В.А. Сидоров. *Широкозонные полупроводники* (СПб., Наука, 2001) с. 128.
- [2] В.Н. Бессолов, Ю.В. Жилияев, Е.В. Коненкова, В.А. Федирко, D.R.T. Zahn. ФТП, **37**, 964 (2003).
- [3] Г.О. Сукач, В.В. Кидалов, А.С. Ревенко. *Подложки для эпитаксиального роста нитридов III группы* (Киев, Четвертая волна, 2007) с. 188.
- [4] П. Ю, М. Кардона. *Основы физики полупроводников* (М., Физматлит, 2002).
- [5] T. Li, C. Simbrunner, M. Wegscheider, A. Navarro-Quezada, M. Quast, K. Schmidegg, A. Bonanni. *J. Cryst. Growth*, **310**, 13 (2008).
- [6] T. Yoshida, Y. Oshima, T. Eri, K. Ikeda, S. Yamamoto, K. Watanabe, M. Shibata, T. Mishima. *J. Cryst. Growth*, **310**, 5 (2008).
- [7] H.J. Park, C. Park, S. Yeo, S.W. Kang, M. Mastro, O. Kryliouk, T.J. Anderson. *Phys. Status Solidi C*, **2** (7), 2446 (2005).
- [8] C. Wetzel, H. Amano, I. Akasaki, J.W. Ager III, I. Grzegory, B.K. Meyer. *Phys. B*, **302–303**, 23 (2001).
- [9] V.Y. Davydov, Y.E. Kitaev, I.N. Goncharuk, A.N. Smirnov, J. Graul, O. Semchinova, A.P. Mirgorodsky, R.A. Evaretov. *Phys. Rev. B*, **58**, 12 899 (1988).

Редактор Л.В. Шаронова

Optical properties of GaN/Al₂O₃ films doped with silicon

N.S. Zayats, P.O. Gentsar, V.G. Boiko, O.S. Litvin,
M.V. Vuychik, A.V. Stronski, I.B. Yanchuk

V. Lashkarev Institute of Semiconductor Physics,
National Academy of Sciences of Ukraine,
03028 Kiev, Ukraine

Abstract The results of morphological and optical studies of GaN films doped with silicon (doping level $N_{\text{Si}} = 1.5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) which were grown by the method of gas phase epitaxy from the metal-organic compounds on the sapphire substrates oriented along c axis are presented. For the grown GaN films the following physical parameters were obtained: energy of the electron transition E_0 , absorption coefficient α , refractive index n , frequencies of the transverse and longitudinal optical lattice vibrations characteristic for the crystalline GaN films.