

Оптические исследования пленок AlN/n-Si (100), полученных методом высокочастотного магнетронного распыления

© Н.С. Заяц, В.Г. Бойко, П.А. Генцарь[¶], О.С. Литвин, В.П. Папуша, Н.В. Сопинский

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

(Получена 11 апреля 2007 г. Принята к печати 23 апреля 2007 г.)

Проведены морфологические и оптические (спектры отражения в диапазоне 200–750 нм, спектры пропускания в диапазоне 2–25 мкм, эллипсометрия) исследования пленок AlN толщиной 2–3 мкм, полученных методом высокочастотного магнетронного распыления алюминиевой мишени в газовой смеси Ar и N₂ (1:3) с осаждением на подложки из монокристаллического кремния n-Si(100) с удельным сопротивлением 20–60 Ом·см. Показано, что пленки являются плотными, прозрачными, аморфными с кристаллическими зернами и могут эффективно использоваться в тонкопленочной технологии для изготовления современных микро- и оптоэлектронных приборов.

PACS: 73.61.Ey, 73.61.Jc, 78.40.Pg, 78.66.Fd

1. Введение

В связи с интенсивным использованием широкозонных полупроводников для создания электронных приборов (полупроводниковые фотопреобразователи для ультрафиолетовой области спектра, приборы для силовой электроники) целесообразно их дальнейшее исследование. Нитрид алюминия (AlN) имеет ширину запрещенной зоны ($E_g = 6.28$ эВ [1]), которая значительно больше по сравнению с германием, кремнием, арсенидом галлия, фосфидом галлия, карбидом кремния, нитридом галлия и твердыми растворами на основе нитридов алюминия и галлия. Кроме того, AlN имеет высокие значения критического (электрического) поля пробоя, большую радиационную стойкость, механическую прочность, является термостойким материалом. На его основе возможно создание светоизлучающих приборов для видимой области спектра. Для AlN отсутствуют собственные подложки, и их рост осуществляется путем гетероэпитаксии с использованием подложек из других материалов, в том числе кремния [1–7]. Технология получения кремния хорошо разработана, поэтому из этого материала можно сделать подложки высокого качества. Кроме того, кремний доступен. В связи с вышесказанным проблема разработки технологии нитридов с параметрами, близкими к теоретическим значениям, что необходимо для увеличения регистрирующей способности приборов, и их диагностики является актуальной.

2. Технология получения пленок AlN/n-Si (100)

Пленки AlN были получены методом высокочастотного магнетронного распыления алюминиевой мишени в газовой смеси Ar и N₂ (1:3) на модернизированной

промышленной установке „Катод-1М“. Рабочее давление в камере составляло 2 Па, а мощность высокочастотного разряда была около 1600 Вт. Начальный вакуум был на уровне остаточного давления $8 \cdot 10^{-4}$ Па. Толщина пленок контролировалась в процессе нанесения пленки на подложку по скорости осаждения, которая равнялась 23 нм/мин. Выращенные пленки AlN имели толщину 2–3 мкм. После технологического процесса толщину контролировали при помощи интерферометра. В качестве подложки использовался кремний электронного типа n-Si (100) с удельным сопротивлением 20–60 Ом·см. Основные результаты в данном сообщении приведены для пленки AlN толщиной 2.85 мкм, полученной на подложке n-Si (100) с удельным сопротивлением 40 Ом·см. Удельное сопротивление подложек контролировали четырехзондовым методом.

3. Морфологические исследования пленок AlN/n-Si (100)

Морфология поверхности подложек и пленок исследовалась на атомно-силовом микроскопе (АСМ) Nanoscope IIIa Dimension 3000 (Digital Instruments, США) в режиме периодического контакта (рис. 1). Измерения проведены в центральной зоне образца с использованием серийных кремниевых зондов NSG-11 с номинальным радиусом закругления острия до 10 нм (NT-MDT, Россия). Морфологические измерения показали, что пленка AlN на подложке n-Si (100) с удельным сопротивлением 40 Ом·см характеризуется более развитой поверхностью в сравнении с подложкой (перед нанесением пленки AlN проводилось химическое травление подложки n-Si (100)). На площади 1×1 мкм² среднеквадратическое отклонение высот пленки равно 0.86 нм, подложки 0.25 нм. Поверхность не структурированная (такая поверхность характерна для аморф-

[¶] E-mail: gentsar@isp.kiev.ua

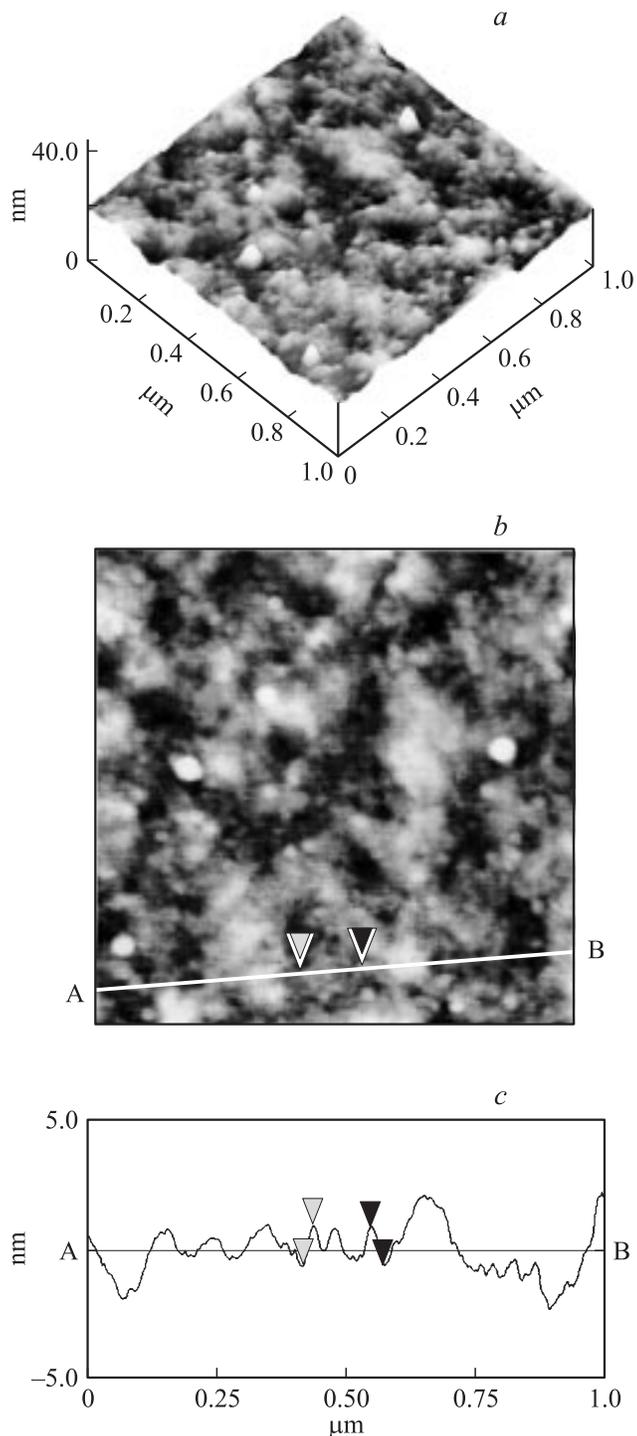


Рис. 1. Трехмерное изображение (*a*), поверхность (*b*) и профиль сечения по прямой *AB* (*c*) пленки AlN на подложке *n*-Si (100).

ных пленок), но на фоне макрорельефа наблюдаются неравномерно размещенные зерна диаметром в основном 20–50 нм и высотой до 3 нм (рис. 1, *b, c*) — это, вероятно, мелкие кристаллиты в аморфной матрице пленки нитрида алюминия; на 1 мкм^2 их насчитывается около 100.

4. Оптические исследования пленок AlN/*n*-Si (100)

На рис. 2 показаны спектры отражения R подложки *n*-Si (кривая 1) и пленки AlN/*n*-Si (кривая 2) в диапазоне длин волн $\lambda = 350\text{--}750 \text{ нм}$.

Обращается на себя внимание тот факт, что на кривой отражения пленки AlN/*n*-Si наблюдается интерференционная картина. Согласно классической оптике [8], можно записать следующие соотношения:

$$m\lambda_1 = 2n(\lambda_1)d, \quad (1)$$

$$(m+1)\lambda_2 = 2n(\lambda_2)d, \quad (2)$$

где m — порядок интерференционной картины, λ_1 и λ_2 — длины волн, при которых наблюдаются соседние минимумы или максимумы, d — толщина пленки, $n(\lambda)$ — показатель преломления пленки. Из соотношений (1) и (2) следует связь между толщиной пленки d и показателем преломления пленки n

$$d = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2[n(\lambda_2)\lambda_1 - n(\lambda_1)\lambda_2]}. \quad (3)$$

Пренебрегая дисперсией показателя преломления в интервале длин волн от λ_1 до λ_2 , можно записать

$$n = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2d(\lambda_1 - \lambda_2)}. \quad (4)$$

Значение показателя преломления пленки AlN/*n*-Si в диапазоне длин волн 618–655 нм (положение соседних минимумов), полученное по формуле (4) и рис. 2, равно 1.919 (толщина пленки равна 2.85 мкм).

Согласно эллипсометрическим исследованиям (эллипсометр ЛЭФ-3М-1) при различных углах падения света, показатель преломления пленки AlN/*n*-Si на длине волны 633 нм имеет значение $n \approx 1.9$. Таким образом, значения показателя преломления n , полученные по спектрам отражения при длинах волн 618–655 нм и

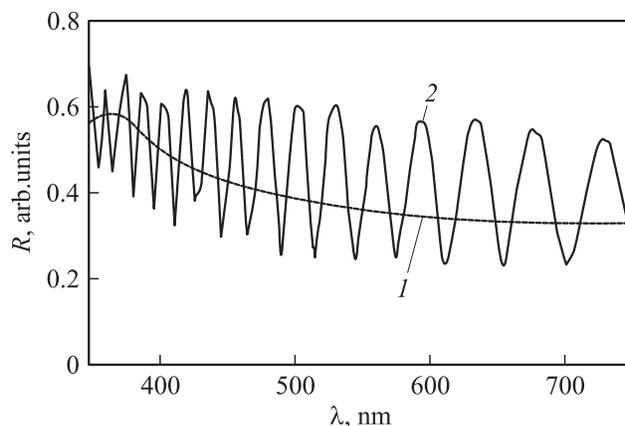


Рис. 2. Спектры отражения подложки *n*-Si (100) (1) и пленки AlN/*n*-Si (100) (2) в диапазоне длин волн 350–750 нм.

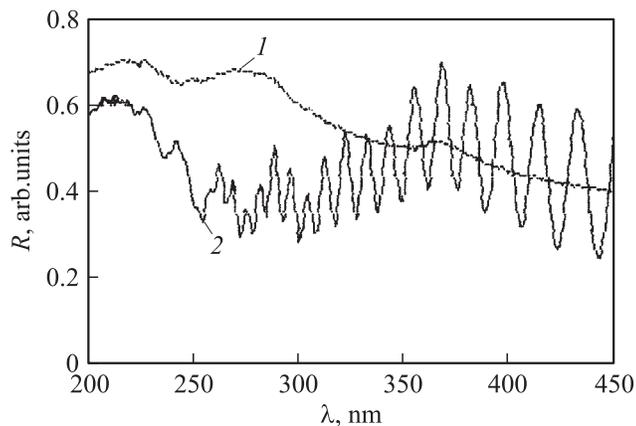


Рис. 3. Спектры отражения подложки n -Si(100) (1) и пленки AlN/ n -Si(100) (2) в диапазоне длин волн 200–450 нм.

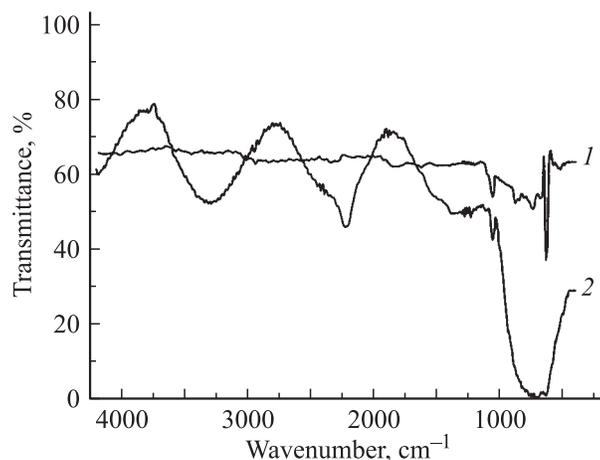


Рис. 4. Спектры пропускания подложки n -Si(100) (1) и пленки AlN/ n -Si(100) (2).

по эллипсометрическим измерениям при длине волны 633 нм, близки. Значение показателя преломления меньше значения n для кристаллов ($n = 2.17$ [1]) и является характерным для плотных аморфных пленок AlN. На плотный характер строения пленки указывает также малое значение шероховатости поверхности пленки (~ 1 нм). Аморфные пленки имеют меньшие утечки при высоких напряжениях электрических полей вследствие отсутствия колончатой структуры, зерен, дислокаций.

На рис. 3 показаны спектры отражения подложки n -Si (кривая 1) и пленки AlN/ n -Si (кривая 2) в диапазоне 200–450 нм. Значение показателя преломления пленки AlN/ n -Si в диапазоне длин волн 292–300 нм (соседние минимумы), полученное по формуле (4) и рис. 3, равно 1.921.

Как видно из рис. 3, зависимость отражения R от длины волны в диапазоне 200–350 нм является немонотонной, т.е. сигнал отражения при длине волны примерно 280 нм имеет минимум. От 280 до 200 нм коэффициент отражения возрастает (длинноволновой

край поглощения для AlN размещен при $\lambda = 200$ нм). Ближе к 200 нм интерференционная картина четко не проявляется.

Спектры пропускания измерялись на автоматизированной установке на базе двухканального спектрометра ИКС-29. Деление сигналов производилось автоматически. От 2 до 7.3 мкм получена интерференционная картина (рис. 4), что дает возможность определить показатель преломления n по известной толщине d в инфракрасной (ИК) области (формула (4)). Так, среднее значение показателя преломления n , вычисленное в диапазоне длин волн 2.7–7.3 мкм по 3 максимумам и 3 минимумам интерференционной картины, равно 1.908 и 1.959 соответственно. В ИК спектре пленки наблюдается характерная полоса поглощения, обусловленная ТО-колебаниями связей Al–N. Ее большая по сравнению с наблюдаемой в кристаллическом AlN ширина и положение максимума при ~ 710 см $^{-1}$ (для кристаллов ~ 670 см $^{-1}$ [9]) характерны для аморфных пленок AlN. Возможными причинами коротковолнового сдвига полосы поглощения по сравнению с кристаллами могут быть присущее данной аморфной пленке распределение длин связей и углов между ними, наличие растягивающих напряжений (постоянные решеток Si, $a = 0.543$ нм, и AlN, $a = 0.311$ нм, $c = 0.498$ нм, [1] различны, поэтому вначале роста пленки AlN на подложке n -Si(100) возникают на границе пленка–подложка механические напряжения, которые по мере роста пленки релаксируют).

Оптические исследования (спектры отражения в диапазоне 200–750 нм, спектры пропускания в диапазоне 2–25 мкм, эллипсометрия) показывают прозрачность и высокую оптическую однородность пленок AlN в широком диапазоне длин волн (ультрафиолетовый, видимый и инфракрасный диапазоны).

5. Заключение

Таким образом, исследования морфологии поверхности и оптических свойств (спектры отражения в диапазоне 200–750 нм, спектры пропускания в диапазоне 2–25 мкм, эллипсометрия) показали, что пленки AlN/ n -Si(100), полученные методом высокочастотного реактивного магнетронного распыления, являются плотными прозрачными аморфными пленками с кристаллическими зернами в матрице нитрида алюминия и могут эффективно использоваться в технологии изготовления современных оптоэлектронных приборов.

Список литературы

- [1] П. Ю. М. Кардона. Основы физики полупроводников (М., Физматлит, 2002).
- [2] Тез. лекций и докл. 3-й Росс. школы ученых и молодых специалистов по физике, материаловедению и технологии получения кремния и приборных структур на его основе. „Кремний. Школа 2005“ (М., МИСиС, 2005).

- [3] А.А. Лебедев, В.Е. Челноков. ФТП, **33** (9), 1096 (1999).
- [4] M.C. Luo, X.L. Wang, J.M. Li, H.X. Liu, L. Wang, D.Z. Sun, Y.P. Zeng, L.Y. Lin. J. Crys. Growth, **244**, 229 (2002).
- [5] H.-E. Cheng, T.-C. Lin, W.-C. Chen. Thin Sol. Films, **425**, 85 (2003).
- [6] M.A. Auger, L. Vazquez, M. Jergel, O. Sanchez, J.M. Albella. Surf. Coat. Technol., **180-181**, 140 (2004).
- [7] C.H. Lai, A. Chin, B.F. Hung, C.F. Cheng, W.J. Yoo, M.F. Li, C. Zhu, S.P. McAlister, D.-L. Kwong. IEEE Electron. Dev. Lett., **26** (3), 148 (2005).
- [8] Т. Мосс, Г. Баррел, Б. Эллис. *Полупроводниковая оптоэлектроника* (М., Мир, 1976).
- [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** (19), 12 899 (1998).

Редактор Л.В. Шаронова

Optical investigation of Al/*n*-Si (100) films obtained by a high-frequency magnetron sputtering method

N.S. Zayats, V.G. Boiko, P.O. Gentsar, O.S. Lytvyn, V.P. Papusha, N.V. Sopinsky

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

Abstract The optical and morphological investigation of AlN films have been carried out. The films of thickness of 2–3 μm were created on *n*-Si(100) substrates with specific resistance of 20–60 $\Omega\cdot\text{cm}$ by a high-frequency magnetron sputtering of an aluminium target in the gas medium of Ar and N_2 mix (1:3). Reflectance spectra in the region of 200–750 nm and transmittance spectra in the region of 2–25 μm have been obtained and ellipsometric measurements were carried out. It was shown that these films represent the crystalline nitride aluminium grains in an amorphous matrix. The films can be used effectively in thin-film technology of manufacturing modern micro- and optoelectronics devices.