

М.С. Заяць, В.Г. Бойко, П.О. Генцарь, О.С. Литвин, М.В. Сопінський

Морфологія поверхні та оптичні властивості плівок AlN/n-Si(100)

*Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України,
пр. Науки 41, Київ-28, 03028, E-mail: gentsar@isp.kiev.ua*

В даній роботі методом високочастотного реактивного магнетронного розпилення алюмінієвої мішені в газовій суміші Ag і N₂ (відповідно 1:3,5) отримані полікристалічні плівки AlN товщиною 0,5-1 мкм на підкладках із монокристалічного кремнію n-Si(100) з питомим опором 500 Ом·см. Досліджено морфологію поверхні та оптичні властивості плівок AlN/n-Si(100) (спектри відбивання в діапазоні 200-750 нм, еліпсоμεтрія, спектри поглинання в діапазоні 2-25 мкм). Показано, що отримані плівки є оптично однорідними в широкому діапазоні довжин хвиль (ультрафіолетовий, видимий та інфрачервоний діапазони) і можуть ефективно використовуватись в тонкоплівковій технології для виготовлення сучасних мікро- і оптоелектронних приладів.

Стаття поступила до редакції 04.06.2007; прийнята до друку 15.12.2007.

У зв'язку з інтенсивним використанням широкозонних напівпровідників для створення електронних приладів (напівпровідникові фотоперетворювачі для ультрафіолетової області спектру, прилади для силової електроніки) доцільно їх дальніше дослідження. Нітрид алюмінію (AlN) має ширину забороненої зони ($E_g = 6,28$ eV), яка значно більша ніж у германію, кремнію, арсеніда галія, фосфіда галія, карбіда кремнію, нітрида галія і твердих розчинів на основі нітридів алюмінію і галія. Крім того AlN має високі значення критичного (електричного) поля пробою, велику радіаційну стійкість, механічну міцність, є температуростійким матеріалом. На його основі можливе створення світловипромінюючих приладів для видимої області спектру. Для AlN поки що відсутні власні підкладки і їх ріст здійснюється шляхом гетероепітаксії з використанням підкладок із інших матеріалів, в тому числі кремнію [1-7]. Технологія отримання кремнію добре розроблена, тому із цього матеріалу можна зробити доброї якості підкладки. Крім того кремній доступний. Тому проблема розробки технології нітридів з параметрами близькими до теоретичних, що необхідно для збільшення реєструючої здатності приладів є актуальною.

Плівки AlN були отримані методом високочастотного реактивного магнетронного розпилення алюмінієвої мішені в газовій суміші Ag і N₂ (відповідно 1:3,5) на модернізованій промисловій установці „Катод 1М”. При цьому використовувалась промислова частота 13,56 МГц. Перед процесом робочий об'єм відкачувався до тиску $1,33 \cdot 10^{-3}$ Па

(10^{-5} тор). Загальний сумарний робочий тиск в камері під час процесу складав 5,6 Па (4×10^{-2} тор). З метою отримання більш структурованої плівки потужність високочастотного розряду складала біля 700 Вт (діаметр мішені 16 см). Товщина плівок контролювалась в процесі нанесення плівки на підкладку по швидкості осадження, яка дорівнювала $1,5 \div 3$ нм/хв. Вирощені плівки AlN мали товщину $0,5 \div 1$ мкм. Після технологічного процесу товщину контролювали за допомогою інтерферометра. В якості підкладки використовувався кремній електронного типу n-Si (100) з питомим опором 500 Ом·см (концентрація електронів N дорівнює $8 \cdot 10^{12}$ см⁻³). Основні результати в даному повідомленні приведені для плівок AlN товщиною 0,716 мкм отриманих на підкладці n-Si (100). Питомий опір підкладок n-Si (100) контролювався чотирьохзондовим методом. Перед нанесенням плівки AlN проводилось хімічне травлення підкладки.

Морфологія поверхні підкладок і плівок досліджувалась на атомно-силового мікроскопі (АСМ) Nanoscope IIIa Dimention 3000 (Digital Instruments, США) в режимі періодичного контакту. Вимірювання проведені в центральній зоні зразка з використанням серійних кремнієвих зондів NSG-11 із номінальним радіусом заокруглення вістря до 10 нм (NT-MDT, Росія). Дослідження морфології поверхні підкладок n-Si (100) і плівок AlN показали, що поверхня кремнію типова для полірованих монокристалічних пластин. Поверхня плівки AlN типова для полікристалу – сформована із

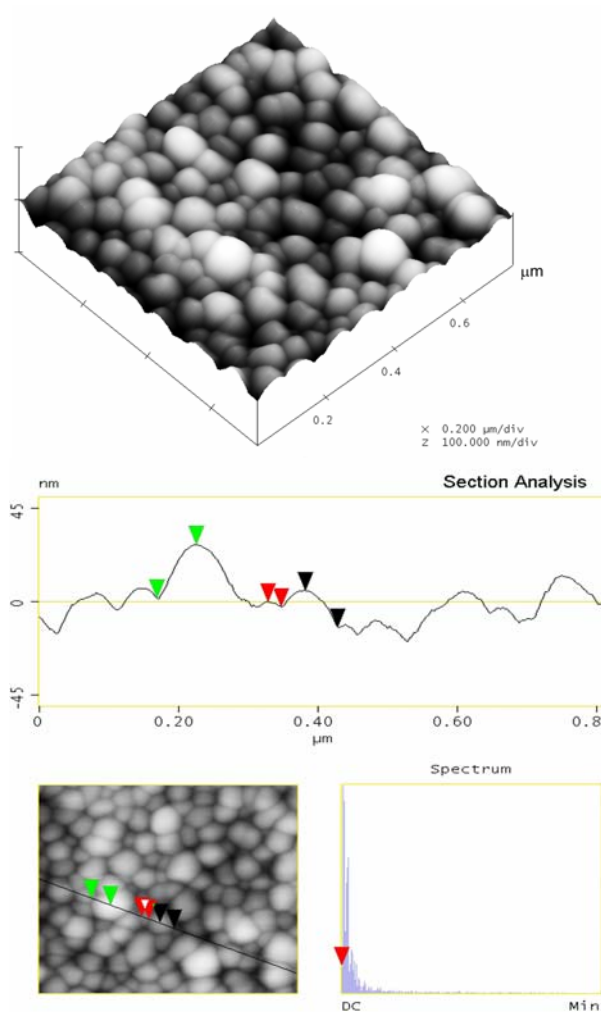


Рис. 1. Зображення поверхні плівки AlN на підкладці n-Si (100) з питомим опором 500 Ом·см.

щільноупакованих зерен з чіткими границями. Горизонтальні розміри зерен лежать в межах від 20

нм до 120 нм. Окремі групи зерен без зміни своїх геометричних розмірів і форми збираються на поверхні в кластери. Густина таких кластерів порядку 300 штук на 100 мкм², їх розміри коливаються: діаметр 250-700 нм, висота 30-150 нм (рис. 1).

В даній роботі виміряні спектри відбивання в діапазоні 200-750 нм (дифракційний ґратковий монохроматор МДР-23) для підкладки n-Si (100) та плівки AlN/n-Si (100) (рис. 2 а,б). Звертає на себе увагу той факт, що на кривій відбивання плівки AlN/n-Si (100) спостерігається інтерференційна картина (рис. 2 а,б – нижня крива). Згідно класичної оптики [8] можна записати наступні співвідношення

$$m\lambda_1 = 2n_1(\lambda_1) \cdot d \quad (1)$$

$$(m+1)\lambda_2 = 2n_2(\lambda_2) \cdot d, \quad (2)$$

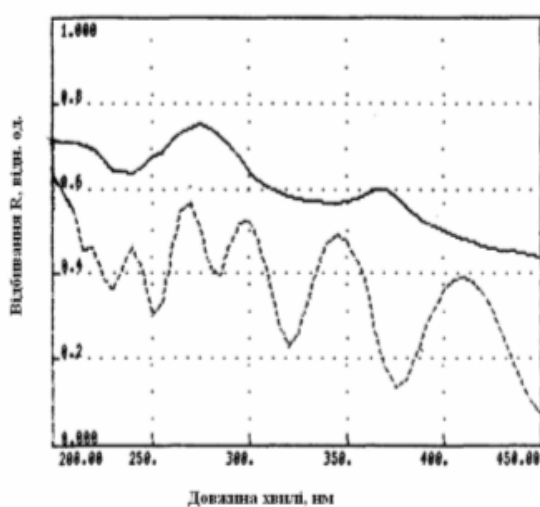
де m – порядок інтерференційної картини, λ_1 і λ_2 – довжини хвиль при яких спостерігаються сусідні мінімуми або максимуми, d – товщина плівки, $n(\lambda)$ – показник заломлення плівки. Із співвідношень (1) і (2) випливає зв'язок між товщиною плівки d і показником заломлення плівки n

$$d = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{2[n_2(\lambda_2) \cdot \lambda_1 - n_1(\lambda_1) \cdot \lambda_2]} \quad (3)$$

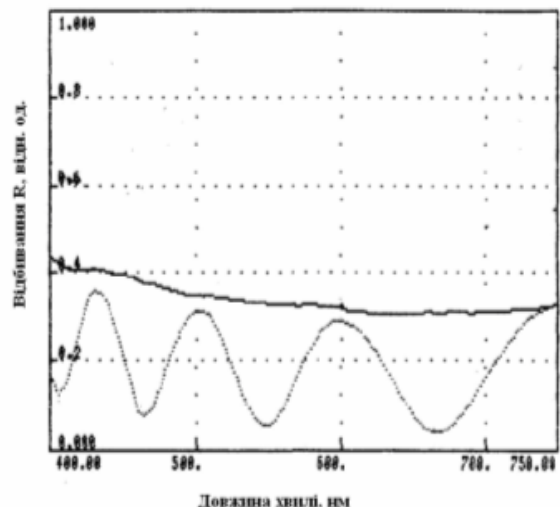
Нехтуючи дисперсією показника заломлення в інтервалі довжин хвиль λ_1 і λ_2 можна записати

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

Значення показника заломлення плівки AlN/n-Si (100) в діапазоні довжин хвиль 545-665 нм (сусідні мінімуми) отримане згідно формули (4) і рис. 2, б дорівнює 2,11. Еліпсометричні вимірювання (еліпсометр ЛЕФ-3М-1) під різними кутами падіння світла на довжині хвилі 633 нм підтвердили значення показника заломлення n отримане із спектрів відбивання. Значення показника заломлення плівки



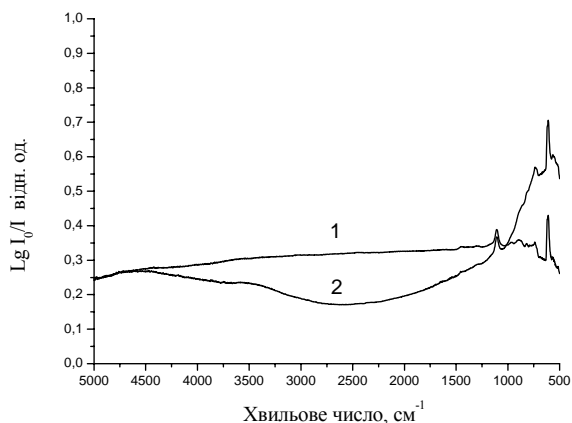
а



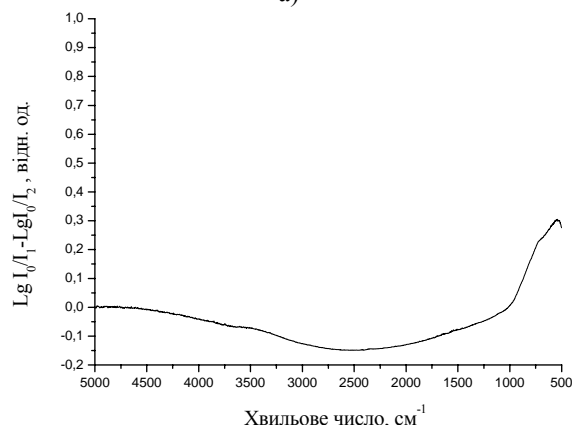
б

Рис. 2. Залежність сигналу відбивання R від довжини хвилі λ для підкладки n-Si(100) (верхня крива) та плівки AlN/n-Si(100) (нижня крива).

AlN типічне для полікристалів (для кристалів $n = 2,17$ [1]). Як видно з рис. 2, а ближче до 200 нм коефіцієнт відбивання зростає (довгохвильовий край поглинання для AlN розміщений при $\lambda = 200$ нм), а інтерференційна картина чітко не проявляється. Значення показника заломлення плівки AlN/n-Si(100) в діапазоні довжин хвиль 231-250 нм дорівнює 2,12. В залежності сигналу відбивання R від довжини хвилі λ в діапазоні 200-350 нм спостерігається



а)



б)

Рис. 3. Залежність поглинання $\lg I_0/I$ від хвильового числа ν , см^{-1} для підкладки n-Si(100) (крива 1) та плівки AlN/n-Si(100) (крива 2) – а; різницевий спектр поглинання плівки та підкладки – б.

немонотонна залежність, тобто сигнал відбивання при довжині хвилі приблизно 280 нм має мінімум (про це свідчить і профіль показника заломлення n в даному діапазоні отриманий згідно формули 4 і рис. 2а), який на жаль розмитий внаслідок інтерференції відбитих променів світла від границі зовнішнє середовище – плівка і границі плівка – кремній.

Спектри поглинання підкладок n-Si (100) (рис. 3а, крива 1) та плівки AlN/n-Si(100) (рис. 3, а, крива 2) в діапазоні 2 – 25 мкм (інфрачервоний спектрофотометр ИФС-113) показали, що в інфрачервоному спектрі плівки спостерігається характерна смуга поглинання, обумовлена ТО-коливаннями зв'язків Al-N. Положення максимуму смуги поглинання відповідає частоті $607\text{-}608 \text{ см}^{-1}$ (для кристалів частота дорівнює 610 см^{-1} [9]).

На це вказує і той факт, що різницевий спектр поглинання плівки і підкладки в області від 1000 до 400 см^{-1} не виконує вже функцію просвітлюючого покриття (рис. 3, б).

Хоча постійні ґраток Si ($a = 0,543$ нм) і AlN ($a = 0,311$ нм; $c = 0,498$ нм) [1] різні, оптичні дослідження плівки AlN/n-Si(100) показали, що плівки AlN оптично однорідні в широкому діапазоні довжин хвиль.

Таким чином, дослідження морфології поверхні і оптичних властивостей плівки AlN/n-Si(100) (спектри відбивання в діапазоні 200-750 нм, еліпсометрія, спектри поглинання в діапазоні 2 – 25 мкм) показали, що отримані плівки методом височастотного реактивного магнетронного розпилення (типів полікристали) є оптично однорідними в широкому діапазоні довжин хвиль (ультрафіолетовий, видимий та інфрачервоний діапазони) і можуть ефективно використовуватись в тонкоплівковій технології для виготовлення сучасних мікро- і оптоелектронних приладів.

[1] Ю П. Кардона М. *Основы физики полупроводников*. Физматлит. Москва. 560 с. (2002).

[2] *Тезисы лекций и докладов третьей Российской школы учёных и молодых специалистов по физике, материаловедению и технологии получения кремния и приборных структур на его основе «Кремний. Школа 2005»*. 4 – 7 июля 2005 г. Москва. МИСиС. 238 с. (2005).

[3] А.А. Лебедев, В.Е. Челноков. Широкозонные полупроводники для силовой электроники // *ФТП*, **33**(9), сс.1096-1099 (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. Structural properties and Raman measurement of AlN films grown on Si (111) by NH_3 -GSMBE // *J. Cryst. Growth*, **244**, pp. 229-235 (2002).

[5] H.-E. Cheng, T.-C. Lin, W.-C. Chen. Preparation of [0 0 2] oriented AlN thin films by mid frequency reactive sputtering technique // *Thin Sol. Films*, **425**, pp. 85-89 (2003).

[6] M.A. Auger, L. Vazquez, M. Jergel, O. Sanchez, J.M. Albella. Structure and morphology evolution of AlN films grown by DC sputtering // *Sur. and Coat. Tech.*, **180-181**, pp. 140-144 (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. A novel program-erasable high-AlN-Si MIS capacitor // *IEEE Elec. Dev. Lett.*, **26** (3), pp. 148-150 (2005).

[8] Т. Мосс, Г. Баррел, Б. Эллис. *Полупроводниковая оптоэлектроника*. Мир, М., 431 с. (1976).

- [9] V.Y. Davydov, Y.E. Kitaev, I.N. Goncharuk, A.N. Smirnov, J. Graul, O. Semchinova, A.P. Mirgorodsky, R.A. Evaretov. Phonon dispersion and Raman scattering in hexagonal GaN and AlN // *Phys. Rev. B*, **58**(19), pp. 12899-12907 (1998).

N.S. Zayats, V.G. Boiko, P.A. Gentsar, O.S. Lyvyn, N.V. Sopinsky

Surface Morphology and Optical Properties of AlN/n-Si (100) Films

*V.E.Lashkarev Institute of Semiconductor Physics, NASU,
Kiev-28, prospect Nauky, 41, 03028, Ukraine, E-mail:gentsar@isp.kiev.ua*

The AlN films of 0.5 - 1 micron thickness on substrates of monocrystal silicon n-Si(100) with specific resistance 500 Ohm cm were obtained by the evaporation of an aluminium target in a gas mix Ar and N₂ (1:3.5) by means of high frequency magnetron sputtering method. It was studied the surface morphology and optical properties of AlN/n-Si (100) films (reflection spectra in the a range of 200-750 nm, ellipsometry, absorption spectra in a range of 2-25 microns). It was shown, that obtained films are optically homogeneous in a wide range of wavelengths (the ultra-violet, visible region and infra-red region) and can effectively be used in thin-film technology for manufacturing modern micro- and optoelectronic devices.