

PACS numbers: 44.10.+i, 52.50.Qt, 65.40.-b, 68.55.-a, 68.60.Dv

## Поперечна теплопровідність плівок нітриду алюмінію та тепловий опір інтерфейсів AlN/Si і AlN/Al

Е. М. Руденко, А. О. Краковний, М. В. Дякін, І. В. Короташ,  
Д. Ю. Полоцький, М. А. Скорик

*Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України,  
бульв. Академіка Вернадського, 36,  
03142 Київ, Україна*

Методом  $3\omega$  досліджено ефективну поперечну теплопровідність  $\lambda_{\perp}$  тонких плівок AlN. Плівки AlN товщиною 1–3 мкм синтезовано на підкладках з монокристалічного Si або Al в гібридному геліконно-дуговому йонно-плазмовому реакторі. Одержані плівки на межі з підкладкою мали тонкий шар неупорядкованого AlN товщиною біля 200 нм. Для плівок AlN на підкладках з монокристалічного Si одержано високе значення коефіцієнта теплопровідності  $\lambda_{\perp Si} = 82,9$  Вт/(м·К). Для плівок AlN на підкладках з Al одержано значення  $\lambda_{\perp Al} = 45,8$  Вт/(м·К), що є найвищим серед відомих для металічних підкладок з Al. Проведена оцінка теплового опору  $R_q$  межі між плівками AlN і підкладками Si або Al. Для інтерфейсу AlN/Si одержано значення  $R_{q \text{ intSi}} = 2,3 \cdot 10^{-8}$  (м<sup>2</sup>·К)/Вт, а для інтерфейсу AlN/Al —  $R_{q \text{ intAl}} = 4,3 \cdot 10^{-8}$  (м<sup>2</sup>·К)/Вт.

**Ключові слова:** теплопровідність, метод  $3\omega$ , нітрид алюмінію, вимірювання температури, інтерфейс, тонкі плівки.

The effective cross-plane thermal conductivity of AlN thin films is studied using  $3\omega$  method. AlN films 1–3  $\mu\text{m}$  thick are synthesized on single-crystal Si and Al substrates without heating in a hybrid helicon-arc ion-plasma reactor with a helicon plasma source and plasma-arc accelerators combined in one

Corresponding author: Eduard Mykhaylovych Rudenko  
E-mail: emrudenko@ukr.net

*G. V. Kurdyumov Institute for Metal Physics, N.A.S. of Ukraine,  
36 Academician Vernadsky Blvd., UA-03142 Kyiv, Ukraine*

Citation: E. M. Rudenko, A. O. Krakovnyy, M. V. Dyakin, I. V. Korotash, D. Yu. Polots'kyu, and M. A. Skoryk, Cross Thermal Conductivity of Aluminium Nitride Films and Thermal Resistance of AlN/Si and AlN/Al Interfaces, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 44, No. 8: 989–1002 (2022) (in Ukrainian). DOI: [10.15407/mfint.44.08.0989](https://doi.org/10.15407/mfint.44.08.0989)

process chamber. The resulting films at the interface with the substrate had a thin layer of disordered AlN about 200 nm thick. A high value of the thermal conductivity coefficient  $\lambda_{\perp\text{Si}} = 82.9 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  is obtained for films synthesized on Si substrates. On Al substrates, the value  $\lambda_{\perp\text{Al}} = 45.8 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  is obtained, which is the highest among those known for Al metal substrates, which are widely used for cooling LED devices. The thermal resistance  $R_q$  of the boundary between AlN films and substrates, which is one of the most important parameters in the creation of a cooling system for electronic devices, is estimated. For the AlN/Si interface, the value  $R_{q \text{ intSi}} = 2.3 \cdot 10^{-8} (\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$  is obtained, and for the AlN/Al interface, AlN/Al is  $R_{q \text{ intAl}} = 4.3 \cdot 10^{-8} (\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$ .

**Key words:** thermal conductivity,  $3\omega$  method, aluminium nitride, temperature measurement, interface, thin films.

*(Отримано 9 червня 2022 р.; остаточн. варіант — 11 липня 2022 р.)*

## 1. ВСТУП

Зі зменшенням габаритів будь-якого мікроелектронного пристрою та одночасним збільшенням його потужності гостро виникає проблема теплоохолодження. Для відводу тепла необхідно використовувати високотеплопровідні та ізоляційні тонкі плівки або покриття. Монокристалічний AlN — один із перспективних матеріалів для ефективних теплопровідників у пристроях мікроелектроніки завдяки високій теплопровідності ( $320 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ ) за кімнатної температури [1]. Однак теплопровідність тонких плівок може істотно відрізнятися від їх масивних аналогів [2, 3–7]. У порівнянні з об'ємними кристалічними матеріалами тонкі плівки, одержані з використанням технологій вакуумного осадження, містять багато домішок, дислокацій та міжзеренних границь, на яких відбувається розсіювання електронів та фононів, що приводить до зменшення теплопровідності плівок [4, 7, 8]. Крім того, у тонких плівках суттєво зростає роль розсіювання тепла на їх поверхнях та міжфазних границях. Ці фактори по-різному впливають на перенесення тепла в площині і перпендикулярно до площини плівки, що приводить до анізотропної теплопровідності тонких плівок у цих двох напрямках. Отже, точний вимір теплопровідності у площині ( $\lambda_{\parallel}$ ) та у перпендикулярному до площини напрямку ( $\lambda_{\perp}$ ) полікристалічних тонких плівок, зокрема AlN, критично необхідний для проектування та створення мікроелектронних пристроїв.

Крім якості кристалічної структури та складу тонких плівок AlN, міжфазна структура між плівкою та підкладкою є ще одним важливим фактором у визначенні теплопровідності всього пристрою та має вирішальне значення для надійності та ефективності пристроїв на основі AlN, що працюють при високій потужності [7, 8].

В даній роботі досліджується ефективна поперечна теплопровідність плівок AlN товщиною 1–3 мкм, які були нанесені на підкладку з монокристалічного кремнію розміром  $20 \times 8 \times 0,45$  мм або на підкладку з алюмінію розміром  $20 \times 30 \times 2$  мм. Плівки AlN були синтезовані в вакуумно-технологічній установці, що має гібридний геліконно-дуговий йонно-плазмовий реактор, який включає в себе геліконне джерело плазми з робочою частотою 13,56 МГц та плазмово-дугові прискорювачі, об'єднані в одній технологічній камері [9].

Для вимірювання теплопровідності в нашій роботі використовується  $3\omega$  метода [10–12].  $3\omega$  метода спирається на фізичний зв'язок величини падіння напруги на третій гармоніці змінного струму частотою  $\omega$  на стрічковому нагрівачі та змінного теплового потоку на частоті  $2\omega$  у діелектричній плівці, на яку нанесено цей стрічковий нагрівач. Тепловий потік у досліджуваній діелектричній плівці, який визначається її коефіцієнтом теплопровідності, викликає відповідну зміну температури нагрівача, яка обумовлена теплообміном із підкладкою (теплообмін із довкіллям через повітря вважається малим), і, відповідно, зміну його опору.

## 2. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТУ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Для вимірювання поперечної теплопровідності  $\lambda_{\perp}$  в нашій роботі використовується запропонована  $3\omega$  метода. Розглянемо цю методу більш ретельно.

Для процесу протікання змінного електричного струму через нанесену металеву смужку («гарячу стрічку») приймемо наступне допущення: електричний струм протікає тільки через сформовану металеву смужку («гарячу стрічку»), яка в цьому випадку є електричним резистивним нагрівачем. На практиці ця умова виконується в разі, якщо опір вимірюваної плівки набагато вищий від опору «гарячої стрічки». В нашому випадку вимірювана плівка AlN, «гаряча стрічка» зроблена з Al і зазначена умова виконується.

Через «гарячу стрічку» пропускається струм, що змінюється за гармонічним законом:

$$I = I_0 \cos(\omega t), \quad (1)$$

де  $I_0$  — амплітуда змінного струму,  $\omega$  — частота струму.

За законом Джоуля–Ленца у нагрівачі при протіканні струму за час  $dt$  виділяється теплота  $dQ$ :

$$dQ = I^2(t)R(t)dt. \quad (2)$$

При цьому потужність  $P$ , що виділяється на нагрівачі:

$$P = dQ / dt. \quad (3)$$

Об'єднуючи рівняння (1)–(3), одержимо:

$$P = I_0^2 R(T) \cos^2(\omega t) = \left( \frac{I_0^2 R(T)}{2} \right)_{\text{DC}} + \left( \frac{I_0^2 R(T) \cos^2(\omega t)}{2} \right)_{2\omega}. \quad (4)$$

Ця потужність  $P$  приводить до зміни температури нагрівача і є суперпозицією компоненти, відповідної постійному нагріванню (перший доданок у виразі (4)), і компоненти, що відповідає зміні температури із подвоєною щодо змінного струму частотою  $2\omega$  (другий доданок у виразі (4)).

Тобто можна записати зміну температури нагрівача:

$$\Delta T = \Delta T_{\text{DC}} + \Delta T_{2\omega} \cos(2\omega t + \varphi), \quad (5)$$

де  $\Delta T_{\text{DC}}$  — зміна температури нагрівача за рахунок постійної складової струму,  $\Delta T_{2\omega}$  — зміна температури нагрівача за рахунок змінної складової,  $\varphi$  — зсув фаз, індукований нагріванням маси зразка.

Залежність опору стрічки-нагрівача від температури в першому наближенні має вигляд:

$$R(T) = R_0(1 + \alpha \Delta T), \quad (6)$$

де  $R_0$  — опір стрічки-нагрівача при температурі, при якій проводяться вимірювання,  $\alpha$  — температурний коефіцієнт опору (ТКО), який визначається виразом:

$$\alpha = \frac{1}{R} \left( \frac{dR}{dT} \right). \quad (7)$$

Підставляючи (5) в (6), одержуємо:

$$R(T) = R_0(1 + \alpha \Delta T_{\text{DC}})_{\text{DC}} + (R_0 \alpha \Delta T_{2\omega} \cos(2\omega t + \varphi))_{2\omega}.$$

Напруга  $U$ , що падає на зразку, визначається законом Ома:

$$U = IR. \quad (8)$$

Підставимо (1) і (7) в (8):

$$U = (I_0 R_0 (1 + \alpha \Delta T_{\text{DC}}) \cos(\omega t))_{\text{power}} + \left[ \left( \frac{I_0 R_0 \alpha \Delta T_{2\omega}}{2} \right) \cos(3\omega t + \varphi) \right]_{3\omega} + \left[ \left( \frac{I_0 R_0 \alpha \Delta T_{2\omega}}{2} \right) \cos(\omega t + \varphi) \right]_{\omega}. \quad (9)$$

У рівняння (9) входить доданок з частотою  $3\omega$ , пропорційний підвищенню температури «гарячої стрічки»:

$$U_{3\omega} = \left[ \left( \frac{I_0 R_0 \alpha \Delta T_{2\omega}}{2} \right) \cos(3\omega t + \varphi) \right]_{3\omega}. \quad (10)$$

Таким чином, при протіканні змінного струму  $I_0 \cos(\omega t)$  по стрічці з опором  $R_0$  і ТКО  $\alpha$  зміну температури «гарячої стрічки»  $\Delta T_{2\omega}$  можна визначити при вимірюванні напруги  $U_{3\omega}$  на третій гармоніці частоти змінного струму:

$$\Delta T_{2\omega} = \frac{2U_{3\omega}}{I_0 R_0 \alpha}. \quad (11)$$

Фізичний зміст виразів (2)–(11) полягає в наступному: в процесі протікання змінного струму через металеву смужку-нагрівач, остання гріється, і, внаслідок позитивного температурного коефіцієнта опору металу, опір смужки росте. Але, оскільки нанесена металева смужка-нагрівач і поверхня досліджуваного зразка мають тепловий контакт, частина тепла переходить від нагрівача до зразка через теплообмін. Кількість тепла, що віддає нагрівач зразку, згідно з формулою (11), пропорційна падінню напруги на третій гармоніці.

З іншого боку, кількісна характеристика розігріву зразка визначається величиною його коефіцієнта теплопровідності. Якщо розв'язати рівняння теплопровідності даної багат шарової системи, можна розрахувати значення коефіцієнта теплопровідності  $\lambda$ .

Ця залежність, як показано в [13], визначається залежністю напруги на третій гармоніці від логарифма другої гармоніки (перший доданок формули (9)):

$$U_{3\omega} = - \frac{U_0^3 \frac{dR}{dT}}{4R_0^2 l \pi \lambda} \ln(2\omega) + B + i \frac{U_0^2}{4lR_0 \lambda}. \quad (12)$$

З формули (12) можна зробити висновок, що падіння напруги на третій гармоніці є лінійною функцією логарифма подвоєної частоти. Кут нахилу лінійної ділянки залежності  $U_{3\omega}$  обернено пропорційний коефіцієнту теплопровідності досліджуваного зразка.

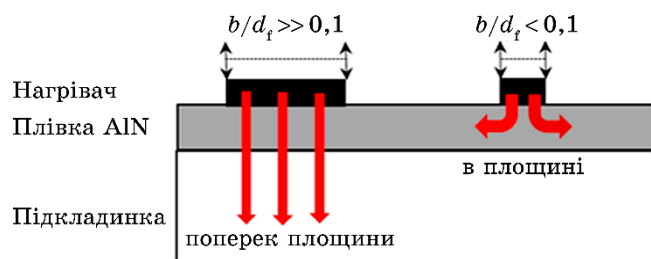
Продиференціюємо обидві частини рівняння (12) за логарифмом частоти  $\partial \ln(2\omega)$  та одержимо вираз для визначення коефіцієнта теплопровідності  $\lambda$ :

$$\lambda = \frac{U_0^3}{4\pi l R_0} \frac{\alpha \partial \ln(2\omega)}{\partial U_{3\omega}}. \quad (13)$$

Тут  $l$  — довжина зразка (стрічки-нагрівача),  $\alpha$  — температурний коефіцієнт електричного опору стрічки-нагрівача (потрібно визначити його окремо),  $U_0$  — амплітуда падіння напруги на стрічці-нагрівачі при її опорі  $R_0$  і струмі  $I_0 \cos(\omega t)$ , що проходить по ній.

Автори [8] розширили методу  $3\omega$  для визначення теплопровідності тонких плівок як в площині плівки  $\lambda_{\parallel}$ , так і перпендикулярно площини плівки  $\lambda_{\perp}$ , змінюючи ширину нагрівача. Запропонований підхід дає змогу одночасно на одному і тому ж зразку виміряти  $\lambda_{\parallel}$  і  $\lambda_{\perp}$ . Як вважають автори [8], коли ширина металевієї смужки-нагрівача  $2b$  набагато перевищує товщину тонкої плівки діелектрика  $d_f$ , теплопровідність стає майже одномірною у напрямку перпендикулярному площині плівки, і теплопровідність у поперечній площині має домінуючий вплив на підвищення температури. З іншого боку, у разі вузького нагрівача, коли  $b/d_f \leq 0,1$  можуть бути одержані дані про теплопровідність у площині. Схема теплових потоків в залежності від напівширини стрічки-нагрівача показана нижче на рис. 1.

Визначимо умови дозволеної частоти  $\omega$  в експерименті. Для того, щоб уникнути впливу відбивання тепла від протилежної поверхні підкладинки при визначенні теплопровідності, треба, щоб глибина проникнення тепла в підкладинку  $\delta$  була в 5 разів менша за товщину  $d_s$  підкладинки, тобто  $\delta < d_s/5$ . Як відомо, амплітуда експоненційно згасної функції зменшується приблизно до 1% від її початкової величини після 5 «констант довжини». Тому можна очікувати, що величина теплових коливань зменшиться нижче 1% від початкової амплітуди після 5 теплових глибин проникнення, оскільки функція Бесселя зменшується швидше, ніж експонента. Таким чином, товщина зразка, яку слід вважати нескінченною, повинна перевищувати 5 помножену на глибину теплового проникнення. Таким чином, оскільки  $\delta = (\chi/2\omega)^{1/2}$  залежить від частоти  $\omega$ , ця умова визначає нижчу межу  $\omega$  в експерименті для підкладинки з коефіці-



**Рис. 1.** Схема теплових потоків в залежності від напівширини стрічки-нагрівача.

**Fig. 1.** Diagram of heat transfer depending on the half-width of the heater tape.

ентом температуропровідності  $\chi$ .

Інша умова, що обумовлює верхню межу для  $\omega$ , є необхідність нагрівачу бути лінійним джерелом. Для цього глибина проникнення  $\delta$  повинна бути набагато більше, ніж половина ширини нагрівача  $b$ . Цю умову можна визначити виразом  $\delta > 5b/2$ . Таким чином, умови, що накладаються на глибину проникнення тепла  $\delta$ , можна записати так:

$$\frac{5b}{2} < \delta < \frac{d_s}{5}. \quad (14)$$

Складність визначення частотного інтервалу у тому, що для визначення характерної глибини проникнення тепла необхідно знати чисельне значення коефіцієнта температуропровідності  $\chi$  досліджуваного зразка, яке, взагалі кажучи, заздалегідь невідомо. Для подолання цієї проблеми необхідно провести вимірювання напруги на третій гармоніці від частоти та побудувати одержану залежність у координатах  $U_{3\omega} = f(2\omega)$  у логарифмічному масштабі. Як показано у виразі (12), дійсна компонента в діпазоні частот, що визначається виразом (14), лінійно залежить від частоти, тоді як уявна компонента є константою. При вимірюваннях поза лінійною ділянкою повинні спостерігатися відхилення від характерного виду залежності від частоти вказаних вище величин. Характерний вид залежності  $U_{3\omega} = f(2\omega)$  проілюстрований на рис. 2 [12].

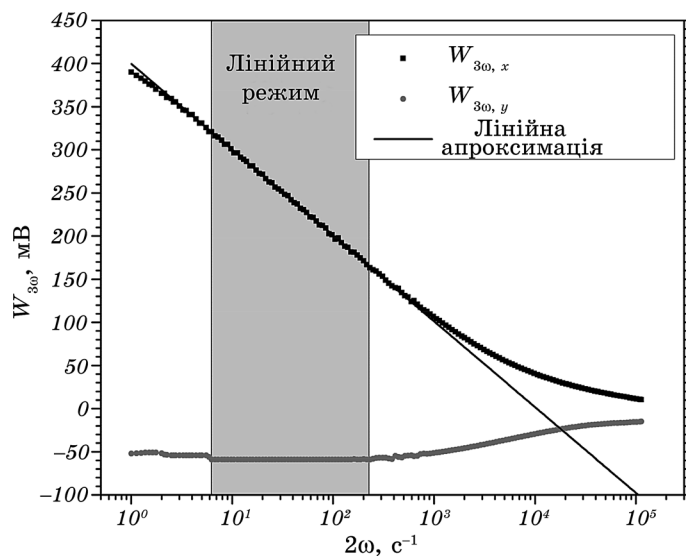


Рис. 2. Залежності  $W_{3\omega}$  від  $\ln(2\omega)$  [12].

Fig. 2. Dependences of  $W_{3\omega}$  on  $\ln(2\omega)$  [12].

Для визначення коефіцієнта поперечної теплопровідності  $\lambda_{\perp}$  плівки AlN товщиною 1–3 мкм були синтезовані на підкладках монокристалічного Si. На поверхню плівки AlN в єдиному технологічному циклі наносили плівку Al товщиною 0,03–0,1 мкм. З плівки Al методом фотолітографії формували стрічку-нагрівач розміром 280×35 мкм. Як бачимо, ширина Al стрічки-нагрівача  $2b$  складала 35 мкм, що набагато більше товщини досліджуваної плівки AlN, яка була 1–3 мкм. Таким чином, були виконані умови для однорізного теплового потоку через плівку AlN.

Далі, для визначення коефіцієнта теплопровідності  $\lambda_{\perp}$  за формулою (13), необхідно визначити температурний коефіцієнт опору  $\alpha$  стрічки-нагрівача Al. Вимірювання опору стрічки-нагрівача Al при різних температурах ми проводили чотирьохзондовою методою. Маніпулятор зі зразком розміщували в теплову шафу та вимірювали ВАХ зразків при різних температурах. За одержаним експериментальним ВАХ розраховувався температурний коефіцієнт опору  $\alpha$  плівок-нагрівачів Al за формулою:

$$\alpha = \frac{1}{R} \left( \frac{dR}{dT} \right). \quad (15)$$

Опір алюмінієвої стрічки-нагрівача розміром 280×70 мкм на плівці AlN, становив  $R_0 = 127$  Ом. При цьому опір частини стрічки, на якій відбувалося Джоулеве нагрівання, за розрахунком становив  $0,64R_0$ . Електричний опір при 19°C склав 90,7 Ом та при температурі 99°C — 94,2 Ом. Розрахунок дав значення температурного коефіцієнту  $\alpha = 0,48 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ .

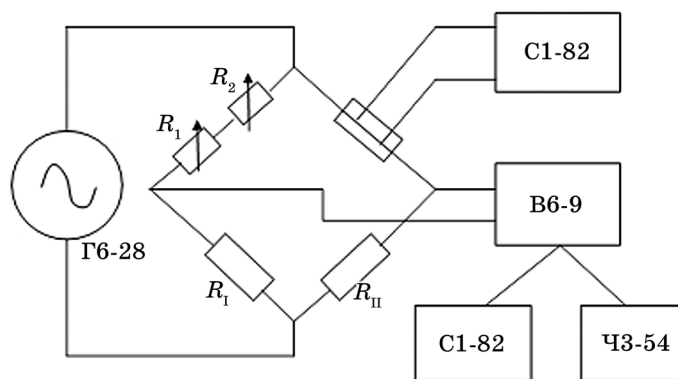
Для вимірювання коефіцієнта теплопровідності  $\lambda$  тонких плівок AlN було використано установку з мостом Уінстона, блок-схема якої наведено на рис. 3.

В установці використана наступна контрольна-вимірювальна апаратура: генератор сигналу Г6-28, селективний мікровольтметр В6-9, на виході якого фіксували параметри сигналу на третій гармоніці осцилографом С1-82 та частотоміром ЧЗ-54.

Вимірювання напруги на третій гармоніці було проведено на мосту Уінстона при плечах містка  $R_I = R_{II} = 10$  Ом. Збалансувавши міст та задаючи частоти змінного струму генератором в діапазоні 40–30000 Гц, за резонансом селективного вольтметра відшукували сигнал із діагоналі моста на потрібній частоті та визначали його амплітуду. За одержаними експериментальними даними був побудований графік залежності амплітуди третьої гармоніки ( $3\omega$ ) змінного струму на діагоналі моста  $W_{3\omega}$  від його подвійної частоти ( $2\omega$ ) в напівлогарифмічному масштабі, лінійна частина якого представлено на рис. 4.

Як бачимо, залежність добре апроксимується прямою лінією в





**Рис. 3.** Блок-схема установки для вимірювання коефіцієнта теплопровідності  $\lambda$  тонких плівок AlN ( $R_1, R_2$  — прецизійні резистори для грубого та точного балансування моста).

**Fig. 3.** Block diagram of an installation for changing the thermal conductivity  $\lambda$  of thin AlN films ( $R_1, R_2$  are precision resistors for coarse and fine balancing of the bridge).

напівлогарифмічному масштабі при чотирьох порядках зміни частоти  $2\omega$ . Перепад  $\Delta W_{3\omega} = 98 - 60 = 38$  мкВ при перепаді  $\Delta \ln(2\omega) = \ln 1000000 - \ln 100 = 9,21$ .

Далі за формулою:

$$U_{3\omega} = \frac{W_{3\omega}(R_0 + R_{II})}{R_{II}}, \tag{16}$$

де  $R_0, R_{II}$  — опір зразка та плеча моста відповідно, одержуємо значення напруги  $U_{3\omega}$  на зразку  $U_{3\omega} = 13,7W_{3\omega}$ .

Пікова амплітуда напруги на зразку становила  $U_0 = 1,4$  В. Розраховуємо за формулою (13) коефіцієнт теплопровідності  $\lambda_{\perp}$  плівки AlN на підкладинці з монокристалічного Si.

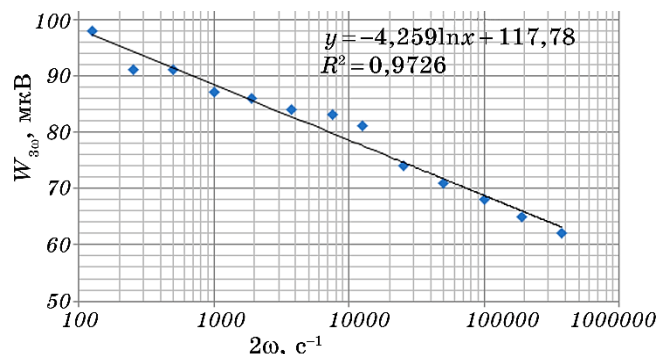
Обчислимо

$$\frac{\partial \ln(2\omega)}{\partial U_{3\omega}} = \frac{\Delta \ln 2\omega}{\Delta U_{3\omega}} = \frac{9,21}{13,7} \Delta W_{3\omega} = 1,8 \cdot 10^4,$$

тоді

$$\lambda_{\perp} = \frac{U_0^3}{(4\pi l)0,64R_{22C}} \frac{\alpha \partial \ln(2\omega)}{\partial U_{3\omega}} = 82,9 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К}).$$

Плівки AlN на Al-підкладинки осаджували в такому ж режимі, як і на підкладинки монокристалічного Si. На плівці AlN за описаною вище методикою створювалася стрічка-нагрівач із Al. Для ви-



**Рис. 4.** Залежність вихідної напруги третьої гармоніки на містку Уінстона  $W_{3\omega}$  при плечах містка  $R_I = R_{II} = 10$  Ом від подвійної частоти для плівки AlN на підкладках монокристалічного Si.

**Fig. 4.** Dependence of the output voltage of the third harmonic on the Winston bridge  $W_{3\omega}$  at the arms of the bridge  $R_I = R_{II} = 10 \Omega$  on the double frequency for the AlN film on monocrystalline Si substrates.

значення коефіцієнту  $\alpha$  цієї стрічки-нагрівача розміром  $280 \times 35$  мкм вимірювали її ВАХ при кімнатній температурі ( $22^\circ\text{C}$ ) та при нагріванні в тепловій шафі до  $122^\circ\text{C}$ . Опір стрічки-нагрівача  $R$  визначали за одержаними ВАХ. При  $22^\circ\text{C}$   $R_{22\text{C}} = 1250$  Ом, а при  $100^\circ\text{C}$  —  $R_{100\text{C}} = 1274$  Ом. Звідси було одержано для алюмінієвої стрічки-нагрівача  $\alpha = 0,246 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ .

Вимірювання напруги на третій гармоніці в діапазоні 40–30000 Гц було проведено на мосту Уінстона, який мав плечі  $R_I = 400$  Ом,  $R_{II} = 2000$  Ом. Лінійну частину одержаної залежності  $W_{3\omega}(2\omega)$  в напівлогарифмічному масштабі представлено на рис. 5.

Як бачимо, перепад  $\Delta W_{3\omega} = 42 - 11,5 = 30,5$  мкВ при перепаді  $\Delta \ln(2\omega) = \ln 10000 - \ln 100 = 4,6$ .

Для розрахунку за формулою (13) коефіцієнта теплопровідності  $\lambda_{\perp}$  плівок AlN використаємо наступні експериментальні дані:  $U_0 = 1,75$  В,  $R_I = 400$  Ом (перше плече моста),  $R_{II} = 2000$  Ом (друге плече моста).

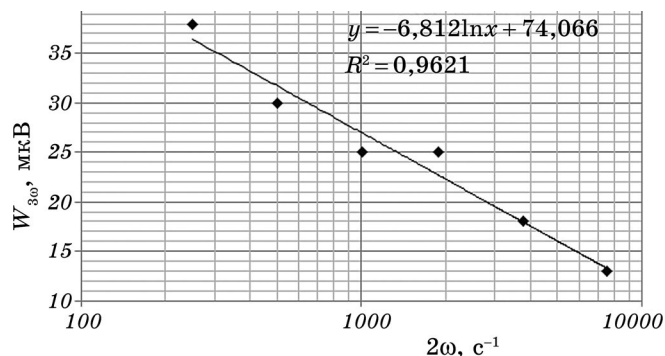
За формулою (16) визначимо  $U_{3\omega} = 1,62 W_{3\omega}$ .

Розрахуємо за формулою (13) коефіцієнт теплопровідності  $\lambda_{\perp}$  плівки AlN на підкладці з Al.

Обчислимо

$$\frac{\partial \ln(2\omega)}{\partial U_{3\omega}} = \frac{\Delta \ln 2\omega}{\Delta U_{3\omega}} = \frac{4,6}{1,62} \Delta W_{3\omega} = 9,3 \cdot 10^4,$$

тоді



**Рис. 5.** Залежність амплітуди сигналу на потрійній частоті  $W_{3\omega}$  від подвійної частоти  $2\omega$  для плівки AlN на Al-підкладинці.

**Fig. 5.** Dependence of the signal amplitude at triple frequency  $W_{3\omega}$  on double frequency  $2\omega$  for an AlN film on an Al substrate.

$$\lambda_{\perp} = \frac{U_0^3}{(4\pi l)0,64R_{22C}} \frac{\alpha \partial \ln(2\omega)}{\partial U_{3\omega}} = 45,8 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К}).$$

Визначимо тепловий опір інтерфейсів між діелектричними плівками AlN та підкладинками з Si і Al, що є важливим параметром при розробці і створенні сучасних електронних приладів мікро- і наноелектроніки, які потребують великого тепловідведення.

На рисунку 6 представлено СЕМ-зображення перетину інтерфейсу між плівкою AlN і підкладинкою із монокристалічного Si.

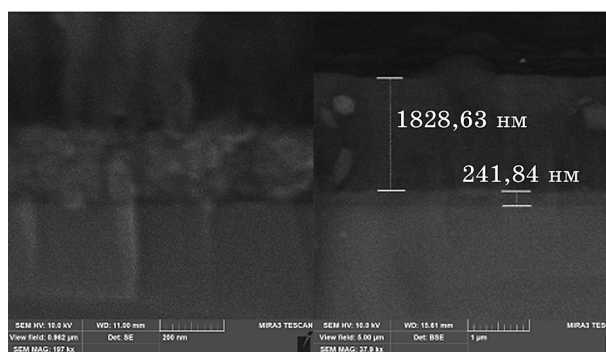
Як бачимо, плівка має два шари  $d = d_1 + d_2$ , де  $d_1 = 1828,63$  нм і  $d_2 = 241,84$  нм. Тепловим інтерфейсом в одержаній структурі є дрібнозернистий тонкий шар товщиною  $d_2 = 241,84$  нм. Розглянемо одержану поперечну теплопровідність плівки AlN як теплопровідність двошарової структури, як це робиться в роботах [4, 8, 14, 15]. Тоді в одномірному моделю послідовного резистора для теплового опору плівки та меж розділу можна записати тепловий опір двошарової структури  $R_q$  як суму теплових опорів шарів плівки  $d_1$  —  $R_{q \text{ AlN}}$  і теплового інтерфейсу шару  $d_2$  —  $R_{q \text{ int}}$ , тобто:

$$R_q = R_{q \text{ AlN}} + R_{q \text{ int}}$$

або

$$\frac{d}{\lambda_{\perp}} = \frac{d_1}{\lambda_{\text{AlN}}} + R_{q \text{ int}},$$

тоді



**Рис. 6.** SEM-зображення перетину інтерфейсу між плівкою AlN і підкладкою із монокристалічного Si.

**Fig. 6.** SEM images of the intersection of the interface between the AlN film and the monocrystalline Si substrate.

$$R_{q \text{ int}} = \frac{d_1}{\lambda_{\text{AlN}}} - \frac{d}{\lambda_{\perp}}$$

Обчислимо величину теплового опору межі AlN/Si  $R_{q \text{ intSi}}$  за такими даними:  $d = 1828,63 \text{ нм} + 241,84 \text{ нм} = 2070,47 \text{ нм}$ ,  $d_1 = 1828,63 \text{ нм}$ ,  $\lambda_{\perp \text{ AlN-Si}} = 82,9 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ .

Щоб одержати вищу межу теплового опору  $R_{q \text{ intSi}}$ , за  $\lambda_{\text{AlN}}$  оберемо найкращі відомі з літератури значення  $\lambda_{\text{AlN } 1} = 100 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$  і  $\lambda_{\text{AlN } 2} = 130 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$  на підкладках монокристалічного Si [16]. Розрахунки з цими даними дали наступне:  $R_{q \text{ intSi}}(\lambda_{\text{AlN } 1} = 100 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})) = 2,26 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$  і  $R_{q \text{ intSi}}(\lambda_{\text{AlN } 2} = 130 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})) = 2,31 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$ .

Обчислимо величину теплового опору межі AlN/Al  $R_{q \text{ intAl}}$ :  $\lambda_{\perp \text{ AlN-Al}} = 45,8 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ .

За тієї ж теплопровідності плівок AlN  $\lambda_{\text{AlN } 1} = 100 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$  і  $\lambda_{\text{AlN } 2} = 130 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$  для підкладок з Al маємо:  $R_{q \text{ intAl}}(\lambda_{\text{AlN } 1} = 100 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})) = 4,28 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$  і  $R_{q \text{ intAl}}(\lambda_{\text{AlN } 2} = 130 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})) = 4,34 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$ .

Для порівняння, для зазначених вище плівок [16], що були синтезовані некомпенсованим магнетроном на (100) підкладках Si, автори одержали тепловий опір  $1 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$  для інтерфейсу AlN-Si.

Спираючись на одержані значення  $R_{q \text{ int}}$ , зробимо оцінку величини теплопровідності шару  $d_2 = 241,84 \text{ нм}$  на підкладці з монокристалічного Si за формулою  $\lambda_2 = d_2/R_{q \text{ int}}$ . Для  $R_{q \text{ intSi}} = 2,26 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$  одержуємо  $\lambda_2 = 10,7 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ , а для  $R_{q \text{ intSi}} = 2,31 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$  величина  $\lambda_2 = 10,5 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ .

Одержані значення теплопровідності шару  $d_2$  можна пов'язати з

невпорядкованими плівками AlN.

Для підкладинки з Al маємо: для  $R_{q \text{ intAl}} = 4,28 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$  одержуємо  $\lambda_2 = 5,7 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ , а для  $R_{q \text{ intAl}} = 4,34 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$  величина  $\lambda_2 = 5,6 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ .

Оскільки алюміній є хемічно активним металом та ще й має велику спорідненість до Оксигену, можна припустити, що тонкий бар'єрний шар  $d_2$  на підкладинці Al може бути аморфним оксидом алюмінію  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Розглянемо результати роботи [15], автори якої провели вимірювання теплопровідності аморфних тонких плівок  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , вирощених за допомогою атомного шарового осадження в діапазоні температур 100–300 К, товщиною від 17,0 до 119,4 нм на підкладинках з сапфіру і германію при 300 К. Теплопровідність аморфних плівок  $\text{Al}_2\text{O}_3$  визначали  $\omega$  методом і вона склала  $1,73 \pm 0,08 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ . Залежність величини теплопровідності від типу підкладинки не спостерігалася. З іншого боку, тепловий граничний опір системи Pt/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ /підкладинка сильно залежить від підкладинки зі значеннями в діапазоні від  $2,1 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$  до  $3,7 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$  при 300 К для плівок, нанесених на сапфір і германій відповідно. Як бачимо, наше припущення має добре узгодження з результатами роботи [15].

В роботі [17] для Rh, Al і Ti на монокристалічному  $\text{Al}_2\text{O}_3$  одержані найнижчі значення  $R_{q \text{ int}} = (0,5-2,0) \cdot 10^{-8} \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ .

Те, що одержане значення  $R_{q \text{ intAl}}$  майже в два рази вище, ніж  $R_{q \text{ intSi}}$ , ми пов'язуємо з можливістю виникнення поблизу інтерфейсу оксидів алюмінію. Крім цього, великий вплив на опір межі має шерсткість поверхні [14]. В нашому випадку середня квадратична шерсткість поверхні монокристалічного Si була біля 2 нм, а для полірованої поверхні Al складала біля 25 нм.

### 3. ВИСНОВКИ

В даній роботі методом  $\omega$  вивчалась поперечна теплопровідність  $\lambda_{\perp}$  тонких плівок AlN.

1. Тонкі плівки AlN (товщиною 1–3 мкм) було синтезовано на підкладинках монокристалічного Si або Al без їх підігріву в гібридному геліконно-дуговому йонно-плазмовому реакторі, який має геліконне джерело плазми та плазмово-дугові прискорювачі, об'єднані в одній технологічній камері. Одержані плівки мали на межі з підкладинкою тонкий шар (біля 200 нм) неспорядкованого AlN або оксиду алюмінію.

2. Для тонких плівок AlN, синтезованих на підкладинках з монокристалічного Si, одержані високі значення коефіцієнта поперечної теплопровідності  $\lambda_{\perp \text{ Si}} = 82,9 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ . Для тонких плівок AlN, синтезованих на підкладинках Al, одержано значення коефіцієнта по-

перечної теплопровідності  $\lambda_{\perp\text{Al}} = 45,8$  Вт/(м·К), що є найвищим значенням серед опублікованих на металічних підкладках Al, які широко застосовуються для охолодження світлодіодних приладів.

Зроблена оцінка теплового опору  $R_q$  межі між плівками AlN і підкладками, що є одним з найважливіших параметрів при створенні системи охолодження електронних приладів. Одержане значення для інтерфейсу AlN/Si склало  $R_{q\text{ intSi}} = 2,3 \cdot 10^{-8}$  м<sup>2</sup>·К/Вт, а для інтерфейсу AlN/Al —  $R_{q\text{ intAl}} = 4,3 \cdot 10^{-8}$  м<sup>2</sup>·К/Вт.

Отже, одержані в роботі високі значення  $\lambda_{\perp}$  і низькі значення  $R_{q\text{ int}}$  демонструють можливість використання геліконних технологій для синтезу тонких діелектричних плівок при виготовленні систем охолодження електронних наноприладів.

## ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА—REFERENCES

1. A. Jacquot, B. Lenoir, A. Dauscher, P. Verardi, F. Craciun, M. Stölzer, M. Gartner, and M. Dinescu, *Appl. Surf. Sci.*, **186**: 507 (2002).
2. Y. Zhao, C. Zhu, S. Wang, J. Z. Tian, D. J. Yang, C. K. Chen, H. Cheng, and P. Hing, *J. Appl. Phys.*, **96**: 4563 (2004).
3. P. K. Kuo, G. W. Auner, and Z. L. Wu, *Thin Solid Films*, **253**: 223 (1994).
4. T. S. Pan, Y. Zhang, J. Huang, B. Zeng, D. H. Hong, S. L. Wang, H. Z. Zeng, M. Gao, W. Huang, and Y. Lin, *J. Appl. Phys.*, **112**: 044905 (2012).
5. S.-M. Lee and D. G. Cahill, *J. Appl. Phys.*, **81**: 2590 (1997).
6. D. G. Cahill, K. Goodson, and A. Majumdar, *J. Heat Transf.*, **124**: 223 (2002).
7. S. R. Choi, D. Kim, S.-H. Choa, S.-H. Lee, and J.-K. Kim, *Int. J. Thermophys.*, **27**: 896 (2006).
8. M. Bogner, G. Benstetter, and Y. Q. Fu, *Surf. Coat. Technol.*, **320**: 91 (2017).
9. E. M. Rudenko, I. V. Korotash, D. Yu. Polotsky, L. S. Osipov, T. A. Prichna, and A. P. Shapovalov, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **37**, No. 4: 499 (2015) (in Russian).
10. T. Borca-Tasciuc, A. R. Kumar, and G. Chen, *Rev. Sci. Instrum.*, **72**: 2139 (2001).
11. D. G. Cahill, *Rev. Sci. Instrum.*, **61**: 802 (1990).
12. David de Koninck, *Thermal Conductivity Measurements Using the 3 Omega Technique: Application to Power Harvesting Microsystems* (Montréal: Department of Mechanical Engineering McGill University: 2008), p. 106.
13. I. Korotash, V. Odinkov, G. Pavlov, D. Polotskii, E. Rudenko, V. Semeniuk, and V. Sologub, *Nanoindustry*, No. 4: 14 (2010) (in Russian).
14. Patrick E. Hopkins, *ISRN Mechanical Engineering*, **2013**: 682586 (2013).
15. J. Paterson, D. Singhal, D. Tainoff, J. Richard, and O. Bourgeois, *J. Appl. Phys.*, **127**: 245105 (2020).
16. C. Duquenne, M.-P. Besland, P. Y. Tessier, E. Gautron, Y. Scudeller, and D. Averty, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **45**: 015301 (2012).
17. E. Swartz and R. Pohl, *Appl. Phys. Lett.*, **51**: 2200 (1987).