

doi: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2018.03.059>

УДК 536.241

**Е.М. Руденко¹, В.М. Сорокін², І.В. Короташ¹, Д.Ю. Полоцький¹,
А.О. Краковний¹, О.Ю. Суворов¹, М.О. Білоголовський¹, Д.В. Пекур²**

¹ Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України, Київ

² Інститут фізики напівпровідників ім. В.Е. Лашкарьова НАН України, Київ

E-mail: emrudenko@ukr.net

Підвищення ефективності тепловідведення від потужних електронних пристроїв через термічні інтерфейси на основі плівок нітриду алюмінію

Представлено членом-кореспондентом НАН України В.М. Сорокіним

Досліджено ефективність використання плівок нітриду алюмінію в якості термічного інтерфейсу. Показано, що такі плівки, отримані в гібридному геліконно-дуговому іонно-плазмовому реакторі, значно поліпшують відвід тепла від кристалів електронних пристроїв, зокрема, від потужних світлодіодів або світлодіодних збірок і таким чином істотно підвищують стабільність їх світіння, надійність і довговічність.

Ключові слова: термічні інтерфейси, тепловідведення, світлодіод, нітрид алюмінію.

Основний напрямок розвитку електронних та електротехнічних пристроїв полягає в зменшенні розмірів окремих елементів і збільшенні їх швидкодії. Однак при цьому неминує зростає тепла енергія, що виділяється в одиниці об'єму. Подальший прогрес в цій області вимагає більш ретельного контролю над тепловими процесами. При цьому тепловідвід стає одним з основних факторів, що обмежують подальшу мініатюризацію таких пристроїв [1].

Головна проблема тепловідведення в мікроелектроніці полягає в наявності теплового опору [2] на межі поділу двох різних середовищ, зокрема, між кристалом інтегральної схеми (чіпом) – джерелом тепловиділення – і підкладкою або корпусом, які служать стоком тепла. Вирішення проблеми стрибка температури на межі поділу двох середовищ можливе шляхом використання спеціальних матеріалів, які забезпечують так званий термічний інтерфейс (thermal interface material – ТІМ). Ідеальний ТІМ повинен мати дуже високу теплопровідність і при цьому ефективно заповнювати порожнечі між двома контактуючими поверхнями. Основною характеристикою ТІМ є тепловий опір інтерфейсу $R_{\text{ТІМ}}$, який характеризує ступінь поширення тепла через нього і пов'язує стрибок температури на межі поділу двох середовищ ΔT з потоком тепла Q через неї $\Delta T = R_{\text{ТІМ}}Q$. При цьому величина $R_{\text{ТІМ}}$ визначається тепловою неузгодженістю між ТІМ і двома контактуючими з ним середовищами, а також його власним тепловим опором, пропорційним товщині ТІМ шару і

© Е.М. Руденко, В.М. Сорокін, І.В. Короташ, Д.Ю. Полоцький, А.О. Краковний, О.Ю. Суворов,
М.О. Білоголовський, Д.В. Пекур, 2018

обернено пропорційним коефіцієнту теплопровідності $\lambda_{\text{ТІМ}}$. Мінімізація значення $R_{\text{ТІМ}}$ є основним фактором при виборі термічного інтерфейсу. Природно, що оптимальний ТІМ повинен мати якомога меншу товщину, максимально можливий коефіцієнт теплопровідності і дуже низькі значення теплового опору на границі ТІМ з двома середовищами, що його оточують. Крім цього, в більшості випадків ТІМ повинен бути ще і електричним ізолятором. Якщо коефіцієнти теплового розширення двох середовищ, що контактують з ТІМ, суттєво відрізняються один від одного, тоді ТІМ має стати свого роду проміжною ланкою, яка пом'якшує наслідки неузгодженості двох кристалічних ґраток. Принципи відбору оптимального матеріалу для термічного інтерфейсу обговорюються в роботі [3].

В даний час використовується кілька типів термічних інтерфейсів: термічні пасти (ідеально заповнюють порожнини між двома середовищами, але під дією зовнішніх напружень можуть витікати з контакту); полімерні матриці, які добре проводять тепло (такий наповнювач робить матеріал дуже жорстким, і тоді потрібно шукати компроміс між двома факторами — його м'якістю і кількістю); металеві припої, які забезпечують хороший контакт ТІМ із середовищами, але можуть розтріскуватися під дією механічної напруги, і, до того ж, є дорогими і складними в обробці, а також електропровідними, що в ряді випадків неприпустимо (див. огляд [4]). Кожен з наведених вище типів термічних інтерфейсів має свої переваги і недоліки. У зв'язку з відсутністю оптимальних рішень зберігається стимул для пошуку нових ТІМ з поліпшеними тепловими характеристиками, оптимальною надійністю і низькою ціною як для мікро- і наноелектроніки, так і для потужних електротехнічних пристроїв, зокрема, для відводу тепла від потужних напівпровідникових випромінюючих світло (LED) структур.

У даній роботі представлені результати дослідження використання в якості матеріалу термічного інтерфейсу плівок перспективного матеріалу — нітриду алюмінію, який поєднує в собі високу теплопровідність (понад $170 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ для квазімонокристалічних плівок) [5], відмінні ізоляційні властивості, механічну міцність і низький коефіцієнт теплового розширення [6]. Нижче наведені результати наших експериментальних досліджень характеристик потужних світлодіодів, що монтувались на алюмінієвій підкладці з товщиною 1,5 мм, покритій шаром (товщина 3–6 мкм) нітриду алюмінію. Отримані дані свідчать про перспективність використання даного матеріалу в якості ТІМ для підвищення ефективності відведення тепла і стабілізації робочої температури потужних електронних пристроїв. Для порівняння нами наведені аналогічні дослідження тих же світлодіодів на теплопровідних друкованих платах Т-101-Г, що складаються з алюмінієвої основи (товщиною 1,5 мм), діелектрика (поліамідної плівки товщиною 100 мкм) та мідної фольги (товщиною 35 мкм).

Незважаючи на те, що нітрид алюмінію є хорошим теплопровідним матеріалом, найбільшу теплопровідність при кімнатній температурі (близько $320 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$) можуть проявляти тільки високоякісні монокристали AlN [7]. Теплопровідність плівок AlN залежить від технології отримання, товщини, наявності та щільності дефектів, вмісту кисню та якості кристалічної структури. Так для плівок AlN на кремнієвих підкладках, отриманих магнетронним напыленням в різних режимах, значення теплопровідності знаходилися в інтервалі від 0,8 до $130 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ [8]. Не менш важливим фактором для ефективного відводу тепла є узгодження кристалічної структури інтерфейсів AlN зі структурою навколишнього середовища. Подальший прогрес в цій області вимагає вибору технології, ретельного під-

бору основних технологічних параметрів виготовлення та аналізу мікроструктури плівок нітриду алюмінію.

Для створення нових високоефективних ТІМ на основі плівок нітриду алюмінію нами була розроблена оригінальна методика отримання високоякісних наноструктурованих плівок нітриду алюмінію на алюмінієвих підкладках, яка полягає в тому, що всі технологічні операції проводяться в єдиному іонно-плазмовому вакуумно-технологічному циклі без розриву вакууму (*in situ*) з використанням низькотемпературної плазми високої щільності. Для реалізації таких вакуумно-технологічних процесів застосовували унікальний гібридний геліконно-дуговий іонно-плазмовий реактор, що складається з геліконного і плазмодугових джерел [9–11].

Процес створення нового ТІМ на основі плівок нітриду алюмінію на алюмінієвій підкладці складався з наступних двох основних етапів.

1. *Підготовка алюмінієвої підкладки*: підкладку розміщували в робочій камері гібридного іонно-плазмового реактора; проводили відкачку робочої камери до отримання вакууму порядку $1,33 \cdot 10^{-2}$ Па; напускали робочий газ аргон до тиску в робочій камері порядку 1,33 Па, включали геліконне джерело плазми для проведення спочатку очищення внутрішньої поверхні робочої камери від залишків атмосферних газів і різних забруднень (режим “Розряд зверху” і в подальшому проведення очищення підкладки від окисної плівки при збільшенні густини плазми і інтенсивності бомбардування іонами аргону поверхні підкладки (режим “Колона”) [10].

Оптимальний час роботи геліконного джерела для ефективного очищення поверхні алюмінієвих підкладок складав близько 10 хв.

2. *Формування плівки нітриду алюмінію на атомарно чистій поверхні алюмінієвої підкладки*: включали плазмодуговий прискорювач (ПДУ), який забезпечував масоперенос матеріалу витратного (алюмінієвого) катода в реакторну камеру, заповнену робочим газом (азот при тиску порядку 1,33 Па), і формування на поверхні алюмінієвої підкладки необхідного шару нітриду алюмінію.

Значення робочих тисків геліконного іонно-плазмового джерела і ПДУ збігалися і становили від 13,3 до 0,133 Па. Це дозволяло двом джерелам плазми спільно здійснювати перенесення іонної складової з додатковою іонізацією області поблизу оброблюваної поверхні алюмінієвої підкладки. При нанесенні плівки нітриду алюмінію на поверхню алюмінієвої підкладки геліконне джерело переводили в режим “Розряд вгору”, а ПДУ працював у режимі “З поворотом дуги” іонного потоку [9, 10]. Завдяки повороту високоенергетичний потік плазми з ПДУ очищався від мікрокраплинної (електронейтральної) фази алюмінію, що забезпечувало отримання якісних плівок нітриду алюмінію. Оскільки поворот дуги здійснювали подачею постійного струму на керуючу котушку, то при включенні повороту дуги геліконне іонно-плазмове джерело переходило з режиму “Розряд вгору” в режим “Колона” зі слабкою концентрацією іонно-плазмової компоненти. Це забезпечувало додаткову іонізацію падаючого потоку і значно зменшувало частку вільних атомів алюмінію та азоту, що не прореагували. Для отримання високоякісної плівки нітриду алюмінію завтовшки 4–5 мкм необхідний час експозиції становив близько п'яти хвилин.

Відомо, що довговічність, ефективність і параметри напівпровідникових інтегральних схем і LED-структур істотно залежать від температури робочої області напівпровідниково-

го кристала і її стабільності в процесі експлуатації. Для визначення ефективності відведення тепла різними ТІМ від робочої зони напівпровідникового кристала необхідно визначити стабільність його робочої температури в процесі експлуатації. Проте безпосередньо виміряти цю температуру в процесі експлуатації для складного багатокомпонентного виробу, до того ж в корпусі, з технічної сторони є дуже складною і трудомісткою задачею. Тому нами була розроблена ефективна експрес-методика визначення температурної стабільності і температурного контролю робочої точки напівпровідникових пристроїв (зокрема, LED-структур), яка полягає в вимірюванні вольт-амперних характеристик (ВАХ) в процесі роботи і порівняння їх з еталонним сімейством ВАХ цього ж пристрою, отриманих при різних температурах кристала. При цьому необхідно було забезпечити відсутність розігріву кристала безпосередньо струмом.

Для визначення ефективності застосування в якості ТІМ плівок нітриду алюмінію, отриманих нами в гібридному геліконно-дуговому іонно-плазмовому реакторі, були виготовлені і досліджені два типи систем відбору тепла від LED-структур, що відрізняються тільки використанням різних ТІМ. У першому типі застосовували стандартний метод охолодження світлодіода, оснований на використанні теплопровідної друкованої плати Т-101-Г, що складається з алюмінієвої основи, діелектрика та мідної фольги. У другому типі в якості ТІМ були використані плівки нітриду алюмінію, нанесені на алюмінієву підкладку. При цьому тестували надяскраві білі світлодіоди LED 3W White 280 Lm BIN1 (виробник Epistar).

Технічні характеристики світлодіодів

Розміри (діаметр × висота), мм	16 × 5
Робоча напруга, В	3,4–3,6
Номинальний струм, мА	700
Потужність, що розсіюється, Вт	3
Кут світіння, град	120
Світловий потік, Лм	260–280
Корельована колірна температура, К	6000–6500
Підвищена робоча температура середовища, °С	не більша 80
Знижена робоча температура середовища, °С	не нижча –40 °С

Для першого типу системи відбору тепла світлодіод з'єднували з мідною поверхнею теплопровідної друкованої плати Т-101-Г за допомогою термопровідної пасти КПТ-19. Для другого типу системи світлодіоди за допомогою термопровідного клею Sealant Silicone RTV-904 монтували на сформовану нами плівку нітриду алюмінію, нанесену на алюмінієву пластину, з якої попередньо були видалені мідна фольга і шар поліаміду.

ВАХ світлодіодів, змонтованих на першому і другому типі систем відбору тепла, вимірювали стандартним чотиризондовим методом [12].

Розглянемо докладніше мезоскопічний контакт алюмінію з нітридом алюмінію і оцінимо тепловий потік, що проходить через нього. При цьому скористаємося аналогією з добре розробленою мікроскопічною теорією зарядового транспорту через гетероконтакти, замінюючи електрони на фонони і статистику Фермі–Дірака на статистику Бозе–Ейнштейна $n_i = [\exp(\epsilon_i - \mu) / (k_B T) - 1]^{-1}$, де ϵ_i – енергія фонуна; μ – хімічний потенціал; k_B – постійна Больцмана [13].

Тепловий потік з шару i в шар j ($i, j = 1, 2$) описується формулою

$$q_{ij} = \frac{1}{4\pi} \sum_{\omega, p} \langle \hbar \omega v_i F_i(\omega, p) \alpha_{ij} \cos \theta \rangle n_i, \quad (1)$$

де ω — частота фонона; p — його поляризація; v_i — групова швидкість, яка залежить від ω і p ; $F_i(\omega, p)$ — густина фононних станів; α_{ij} — ймовірність проходження фонона через інтерфейс між i та j шарами; θ — кут між імпульсом фонона і нормаллю до поверхні розділу двох шарів, $\langle \dots \rangle$ означає інтегрування по півсфері. Винесемо α_{ij} за межі підсумовування і інтегрування, замінивши цю величину середнім значенням $\tilde{\alpha}_{ij}$. Тоді отримаємо, що потік тепла q_{ij} пропорційний опроміненню E_i — густині потоку енергії випромінювання, що падає на поверхню розділу з боку i -го шару:

$$q_{ij} = \tilde{\alpha}_{ij} E_i. \quad (2)$$

Зі співвідношення (1) випливає, що для контактів діелектрик—діелектрик і метал—діелектрик, в яких тепло переноситься тільки фононами, тепловий потік q_{ij} визначається декількома факторами, а саме, робочою температурою, спектром коливань кристалічної ґратки і якістю інтерфейсу. Остання характеристика значною мірою залежить від умов виготовлення досліджуваних гетероструктур, проте навіть в ідеальному контакті двох різних пружних середовищ параметр $\alpha_{12} < 1$ через те, що їх пружні властивості, зокрема, швидкості звуку $c_1(\theta)$ і $c_2(\theta)$, а також густини ρ_1 і ρ_2 відрізняються один від одного. Якщо дотримуватися дебаєвського наближення довгохвильових фононів, тоді [14]

$$\alpha_{12}(\theta) = \frac{4\rho_1\rho_2c_1(\theta_1)c_2(\theta_2)\cos\theta_1\cos\theta_2}{(\rho_1c_1(\theta_1)\cos\theta_2 + \rho_2c_2(\theta_2)\cos\theta_1)^2}. \quad (3)$$

Тут кути θ_1 і θ_2 пов'язані співвідношенням, яке аналогічне закону заломлення в оптиці $\sin\theta_1 / \sin\theta_2 = c_2(\theta_2) / c_1(\theta_1)$, індекс p ми опускаємо.

Співвідношення (3) було отримано в рамках ідеалізованого уявлення про впорядковану кристалічну структуру двох плівок поблизу плоского інтерфейсу. При розсіюванні на шорсткій границі поперечна компонента імпульсу фонона і його поляризація не зберігаються, а виконується лише умова $\omega = \text{const}$. На відміну від рівняння (3) в дифузійному наближенні вираз для α_{12} стає несиметричним по відношенню до заміни індексів $1 \rightarrow 2$ і в рамках моделі Дебая має вигляд [15]

$$\alpha_{12} = \frac{c_1^2}{c_1^2 + c_2^2}. \quad (4)$$

Використовуючи дані [8] для усереднених швидкостей звуку в двох контактуючих матеріалах — нітриді алюмінію $c_1 = 7,0 \cdot 10^5$ см/с і алюмінію $c_2 = 5,2 \cdot 10^5$ см/с, ми отримаємо, що на інтерфейсі AlN/Al $\alpha_{12} \approx 0,64$. Це означає, що велика частина тепла в наших зразках, дійсно, переходить з нітриду алюмінію в алюміній.

Як і слід було очікувати, при нагріванні LED-структур їхні ВАХ помітно змінювалися через зниження опору кристала світлодіода. На першому етапі були отримані еталонні сімейства ВАХ для кожного з досліджуваних типів систем відбору тепла від LED-структур, виміряні при температурах кристала світлодіодів T від 40 °С до 120 °С. Для цього зразки по-

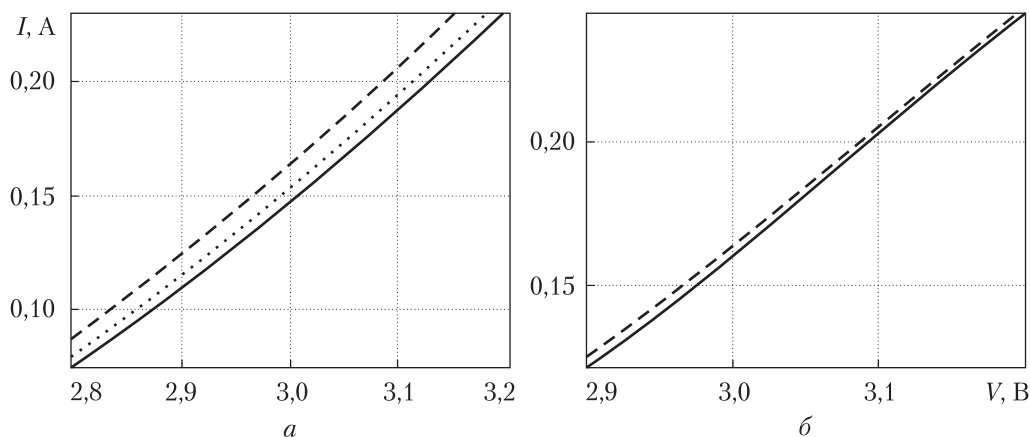


Рис. 1. Вольт-амперні характеристики світлодіода LED 3W White 280 Lm BIN1 на алюмінієвій пластині з промисловим ТІМ, друкована плата Т-101-Г (а) і з ТІМ плівкою нітриду алюмінію (б). Суцільні криві — результати вимірів без нагріву при температурі 13 °С; пунктирна крива — ефект нагріву струмом навантаження 300 мА, що відповідає температурі 25 °С на рис. 1, а; штрихові криві — ефект нагріву струмом навантаження 550 мА, що відповідає температурі 54 °С на рис. 1, а і лише 23 °С на рис. 1, б

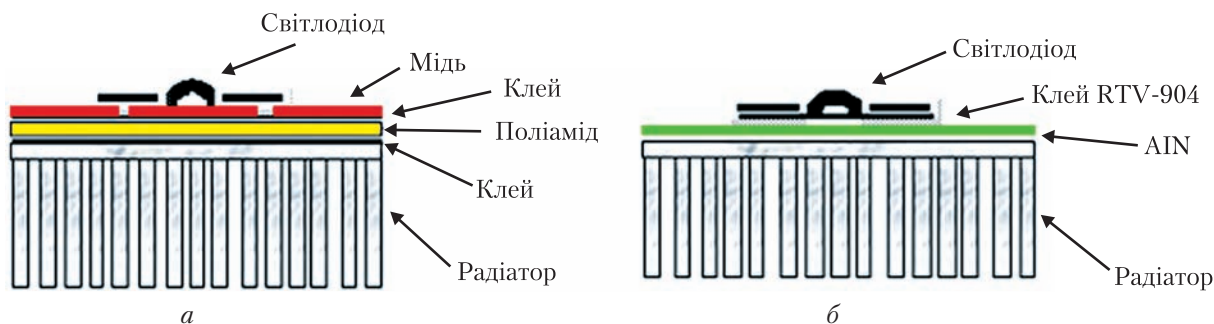
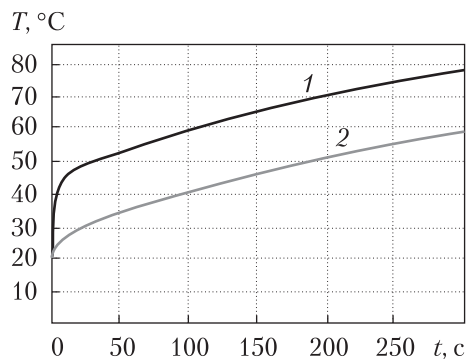


Рис. 2. Конструкції тепловідведення від світлодіода для класичної схеми відведення тепла (а) і схеми з використанням термічного інтерфейсу на основі плівки нітриду алюмінію (б)

міщали в термошафу, що забезпечувало нагрів і стабілізацію температури пристроїв в процесі досліджень, і проводили вимірювання ВАХ при фіксованих температурах. При цьому світлодіод, підключений до вимірювальної системи, нагрівали до певної температури без подачі на нього напруги. Потім ВАХ записували протягом менш ніж однієї секунди. Для цього використовували джерело струму з тривалістю розгортки струму 0,5 с. За цей час кристал світлодіода не встигав помітно нагрітися вимірювальним струмом, про що свідчила практична відсутність на ВАХ гістерезису при зміні напрямку розгортки. Температура зразка змінювалась із кроком в десять градусів і при кожній температурі записувалась відповідна ВАХ.

Для визначення ефективності тепловідведення відповідним ТІМ кристал світлодіода нагрівали навантажувальним струмом під час світіння. Для цього через світлодіод пропускали струми величиною 300 і 550 мА протягом 20 с, які розігрівали його. Відразу після відключення навантажувального струму на зразок подавався імпульс вимірювального струму три-

Рис. 3. Динаміка зміни температури кристала світлодіода потужністю 3 Вт в часі для двох конструкцій систем тепловідводу, представлених на рис. 2: 1 – поліамід; 2 – нітрид алюмінію



валістю 0,5 с і проводили запис ВАХ. Отримані таким чином ВАХ випромінюючої світло LED-структури порівнювали з температурно-каліброваним еталонним сімейством її ВАХ. Таким чином, в кожному конкретному експерименті можна було визначити величину зміни температури кристала світлодіода під час його роботи, що дозволяло порівняти ефективність застосовуваних ТІМ, оскільки всі інші елементи систем відбору тепла від LED-структур були однаковими.

Типові ВАХ зазначених LED-структур з двома типами ТІМ представлені на рис. 1. Для випромінюючих структур зі світлодіодами LED 3W White 280 Lm BIN1 на алюмінієвій пластині і промислового ТІМ (шар поліаміду з мідними електродами) на рис. 1, а наведені еталонна ВАХ (суцільна крива) при температурі 13 °С (без подачі струму навантаження і без світіння світлодіода) і ВАХ при струмах навантаження 300 мА (пунктирна крива) і 550 мА (штрихова крива) і при світінні світлодіода. Для випромінюючих структур зі світлодіодами LED 3W White 280 Lm BIN1 на алюмінієвій пластині і запропонованому нами ТІМ з нітриду алюмінію (товщина 5 мкм) на рис. 1, б наведена еталонна ВАХ (суцільна крива) при кімнатній температурі 13 °С (без подачі струму навантаження і без світіння світлодіода) і ВАХ (штрихова крива) при струмі навантаження 550 мА і при світінні світлодіода. ВАХ при струмі навантаження 300 мА на рис. 1, б не відображено.

Порівнюючи еталонну ВАХ і ВАХ при струмі навантаження 550 мА для двох типів ТІМ (див. рис. 1) можна зробити висновок, що температура світлодіода, встановленого на алюмінієвій пластині з використанням промислового ТІМ – друкована плата Т-101-Г, значно підвищується під впливом струму навантаження I_H при тривалості роботи 20 с. При цьому на рис. 1, а крива для $I_H = 300$ мА відповідає температурі 25 °С, а для $I_H = 550$ мА – 54 °С. У той же час саме такий струм практично не впливав на температуру світлодіода, встановленого на ТІМ з нітриду алюмінію, оскільки на рис. 1, б крива для $I_H = 550$ мА відповідає температурі лише 23 °С (температури визначали на основі описаного вище методу вимірювання ВАХ при фіксованих температурах).

Для підтвердження ефективності ТІМ на основі плівок нітриду алюмінію для відведення тепла від потужних світлодіодів було проведено моделювання динаміки зміни в часі температури кристала світлодіода потужністю 3 Вт для двох конструкцій систем тепловідводу, представлених на рис. 2. Стандартна система (рис. 2, а) складалася з радіатора з приєднаної до нього за допомогою термопасти алюмінієвої пластини із шаром ізолюючого матеріалу (поліаміда) і мідної фольги зі сформованими електродами для пайки світлодіода і його контактів. Друга система (рис. 2, б) представляла собою той же радіатор, на плоску поверхню якого нанесено шар нітриду алюмінію.

При моделюванні використовували модуль Flow Simulation програмного комплексу САПР Solidworks. Вхідними даними для моделювання були геометричні розміри, які відпо-

відали експериментальним зразкам, а також довідкові параметри використуваних матеріалів. Результати моделювання представлені на рис. 3.

Дані порівняльних досліджень світлодіодів, розміщених на алюмінієвій підкладці, свідчать про поліпшення теплопередачі між двома контактуючими середовищами і про ефективне відведення тепла від світловипромінювальних діодів при використанні плівок AlN в якості ТІМ в порівнянні з тими, що застосовуються зараз у промисловості.

Таким чином, плівки нітриду алюмінію, отримані в гібридному геліконно-дуговому іонно-плазмовому реакторі, можуть ефективно застосовуватись для поліпшення відводу тепла від кристалів електронних пристроїв, зокрема, від потужних світлодіодів або світлодіодних збірок, що значно підвищить стабільність їх світіння, надійність і довговічність.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Moore, A. L., Shi L. Emerging challenges and materials for thermal management of electronics. *Mater. Today*. 2014. **17**. № 4. P. 163–174. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2014.04.003>
2. Pollack G. L. Kapitza resistance. *Rev. Modern Phys.* 1969. **41**, № 1. P. 48–81. doi: <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.41.48>
3. Due J., Robinson A. J. Reliability of thermal interface materials: a review. *Appl. Thermal Eng.* 2013. **50**, № 1. P. 455–463. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.06.013>
4. Prasher R. Thermal interface materials: historical perspective, status, and future directions. *Proc. IEEE*. 2006. **94**, № 8. P. 1571–1586. doi: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2006.879796>
5. Bogner M., Benstetter G., Fu Y. Q. Cross- and in-plane thermal conductivity of AlN thin films measured using differential 3-omega method. *Surf. Coat. Technol.* 2017. **320**. P. 91–96. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.01.100>
6. Часнык В. И. Применение высокотеплопроводной керамики из нитрида алюминия в вакуумных электронных приборах СВЧ. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. 2013. № 4. С. 8–12.
7. Slack G. A. Nonmetallic crystals with high thermal conductivity. *J. Phys. Chem. Solids*. 1973. **34**. № 2. P. 321–335. doi: [https://doi.org/10.1016/0022-3697\(73\)90092-9](https://doi.org/10.1016/0022-3697(73)90092-9)
8. Pan T. S., Zhang Y., Huang J., Zeng B., Hong D. H., Wang S. L., Zeng H. Z., Gao M., Huang W., Lin Y. Enhanced thermal conductivity of polycrystalline aluminum nitride thin films by optimizing the interface structure. *J. Appl. Phys.* 2012. **112**, № 4. P. 044905–1–044905-5. doi: <https://doi.org/10.1063/1.4748048>
9. Семенюк В.Ф., Руденко Э.М., Коротаєв І.В., Осипов Л.С., Полоцький Д.Ю., Шамрай К.П., Одиноків В.В., Павлов Г.Я., Сологуб В.А. Унифіцированное технологическое ионно-плазменное оборудование формирования наноструктур. *Металлофизика и новейшие технологии*. 2011. **33**, № 2. С. 223–231.
10. Осипов Л., Руденко Э., Семенюк В., Коротаєв І., Одиноків В., Павлов Г., Сологуб В. Высокоэффективный источник низкотемпературного нанесения пленок и покрытий. *Наноиндустрия*. 2010. № 2. С. 4–6.
11. Плазмовий пристрій нанесення багат шарових пліткових покриттів: пат. 87747 Україна. МПК С23С 14/34 (2006.01). Заявл. 17.12.2010. Опубл. 25.02.2014.
12. Воробьев Ю.В., Добровольский В.Н., Стриха В.И. Методы исследования полупроводников. Киев: Вища школа, 1988. 232 с.
13. Chen G. Nanoscale energy transport and conversion: a parallel treatment of electrons, molecules, phonons, and photons. Oxford, UK: Oxford Univ. Press. 2005. 531 с.
14. Little W. A. The transport of heat between dissimilar solids at low temperatures. *Can. J. Phys.* 1959. **37**, № 3. P. 334–349. doi: <https://doi.org/10.1139/p59-037>
15. Swartz E. T., Pohl R. O. Thermal boundary resistance. *Rev. Mod. Phys.* 1989. **61**, № 3. P. 605–668. doi: <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.61.605>

Надійшло до редакції 13.11.2017

REFERENCES

1. Moore, A. L. & Shi, L. (2014). Emerging challenges and materials for thermal management of electronics. *Mater. Today*, 17, No. 4, pp. 163-174. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2014.04.003>
2. Pollack, G. L. (1969). Kapitza resistance. *Rev. Modern Phys.* 41, No. 1, pp. 48-81. doi: <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.41.48>
3. Due, J. & Robinson, A. J. (2013). Reliability of thermal interface materials: a review. *Appl. Thermal Eng.* 50, No. 1, pp. 455-463. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.06.013>
4. Prasher, R. (2006) Thermal interface materials: historical perspective, status, and future directions. *Proc. IEEE*, 94, No. 8, pp. 1571-1586. doi: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2006.879796>
5. Bogner, M., Benstetter, G. & Fu, Y. Q. (2017). Cross- and in-plane thermal conductivity of AlN thin films measured using differential 3-omega method. *Surf. Coat. Technol.* 320, pp. 91-96. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.01.100>
6. Chasnyk, V. I. (2013). Application of high-conductivity aluminum nitride ceramics in vacuum electronic microwave devices. *Techn. Design. Electron. Equipment*. No. 4, pp. 8-12 (in Russian).
7. Slack, G. A. (1973). Nonmetallic crystals with high thermal conductivity. *J. Phys. Chem. Solids*. 34, No. 2, pp. 321-335. doi: [https://doi.org/10.1016/0022-3697\(73\)90092-9](https://doi.org/10.1016/0022-3697(73)90092-9)
8. Pan, T. S., Zhang, Y., Huang, J., Zeng, B., Hong, D. H., Wang, S. J., Zeng, H. Z., Gao, M., Huang, W. & Lin, Y. (2012). Enhanced thermal conductivity of polycrystalline aluminum nitride thin films by optimizing the interface structure. *J. Appl. Phys.* 112, No. 4, pp. 044905-1-044905-5. doi: <https://doi.org/10.1063/1.4748048>
9. Semeniuk, V. F., Rudenko, E. M., Korotash, I. V., Osipov, L. S., Polotsky, D. Yu., Shamray, V. V., Odinson, V. V., Pavlov, G. Ya. & Sologub, V. A. (2011). Unified technological ion-plasma equipment for the formation of nanostructures. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 33, No. 2, pp. 223-231 (in Russian).
10. Osipov, L., Rudenko, E., Semeniuk, V., Korotash, I., Odinson, V., Pavlov, G. & Sologub, V. (2010). Highly effective source of the low-temperature deposition of films and coatings. *Nanoindustr.* № 2, pp. 4-6 (in Russian).
11. Pat. 87747 UA, IPC C23C 14/34 (2006.01), Plasma device for application of multilayered film coatings, Veremejchenko, G. N., Korotash, I. V., Rudenko, E. M., Semeniuk, V. F., Odinson, V. V., Pavlov, H. Y. & Sologub, V. A. Publ. 25.02.2014 (in Ukrainian).
12. Vorobyov, Yu. V., Dobrovolskii, V. N. & Strikha, V. I. (1988). *Methods for studying semiconductors*. Kyiv: Vyscha Shkola.
13. Chen, G. (2005). *Nanoscale energy transport and conversion: a parallel treatment of electrons, molecules, phonons, and photons*. Oxford: Oxford Univ. Press.
14. Little, W.A. (1959). The transport of heat between dissimilar solids at low temperatures. *Can. J. Phys.* 37, No. 3, pp. 334-349. doi: <https://doi.org/10.1139/p59-037>
15. Swartz, E. T. & Pohl, T. O. (1989). Thermal boundary resistance. *Rev. Mod. Phys.* 61, No. 3, pp. 605-668. doi: <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.61.605>

Received 13.11.2017

Э.М. Руденко ¹, В.М. Сорокин ², И.В. Короташ ¹, Д.Ю. Полоцкий ¹,
А.А. Краковный ¹, А.Ю. Суворов ¹, М.А. Белоголовский ¹, Д.В. Пекур ²

¹ Институт металлофизики им. Г.В. Курдюмова НАН Украины, Киев

² Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева НАН Украины, Киев

E-mail: emrudenko@ukr.net

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОТВОДА ОТ МОЩНЫХ
ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ ЧЕРЕЗ ТЕРМИЧЕСКИЕ ИНТЕРФЕЙСЫ
НА ОСНОВЕ ПЛЕНОК НИТРИДА АЛЮМИНИЯ

Исследована эффективность использования пленок нитрида алюминия в качестве термического интерфейса. Показано, что такие пленки, полученные в гибридном геликонно-дуговом ионно-плазменном реакторе, значительно улучшают отвод тепла от кристаллов электронных устройств, в частности, от мощных светодиодов или светодиодных сборок и таким образом существенно повышают стабильность их свечения, надежность и долговечность.

Ключевые слова: термические интерфейсы, теплоотвод, светодиод, нитрид алюминия.

*E.M. Rudenko*¹, *V. M. Sorokin*², *I.V. Korotash*¹, *D.Yu. Polotsky*¹,
*A.O. Krakovny*¹, *O.Yu. Suvorov*¹, *M.O. Belogolovskii*¹, *D.V. Pekur*²

¹ G.V. Kurdyumov Institute for Metal Physics of the NAS of Ukraine, Kiev

² V.E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics of the NAS of Ukraine, Kiev

E-mail: emrudenko@ukr.net

ENHANCEMENT OF THE EFFICIENCY OF HEAT REMOVAL
FROM POWERFUL ELECTRONIC DEVICES THROUGH THERMAL
INTERFACES BASED ON ALUMINUM NITRIDE FILMS

The efficiency of aluminum nitride films as thermal interfaces has been studied. It is shown that such films obtained in a hybrid helicon-arc ion-plasma reactor significantly improve the heat removal from the crystals of electronic devices, in particular, from powerful LEDs or LED assemblies, and thus noteworthy increase their luminosity, reliability, and durability.

Keywords: *thermal interfaces, heat sink, LED, aluminum nitride.*