

В.М. Шеремет, к.ф.-м.н., с.н.с.

П.О. Сай, стажер-дослідник

Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України

ФОРМУВАННЯ ОМІЧНИХ КОНТАКТІВ ДО НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СПОЛУК A^3N

Розглянуто процес формування омичних контактів до перспективних напівпровідникових сполук A^3N : GaN, AlN, InN. Досліджено структурні й електрофізичні параметри контактних структур Au-Pd-Ti-Pd-n-GaN, Au-Pd-Ti-Pd-n-AlN та Au-Pt-Ti-n-InN/GaN/Al₂O₃. Виявлено і досліджено механізм струмопереносу по провідних дислокаціях з дифузійним обмеженням носіїв струму.

Ключові слова: тринітриди, GaN, AlN, InN, омичний контакт, механізм струмопереносу.

Вступ. Постановка проблеми. Розвиток напівпровідникової електроніки в наш час тісно пов'язаний з розробкою приладів на основі III-нітридів: GaN, AlN, InN і твердих розчинів на їх основі. Ці напівпровідники широко використовуються в оптоелектроніці і, маючи ширину забороненої зони 3,4 еВ, 6,2 еВ та 0,7 еВ (таб. 1) відповідно, при використанні твердих розчинів на їх основі дозволяють перекрити широкий діапазон електромагнітного випромінювання у видимому діапазоні [1]. Найбільш вивченим матеріалом серед тринітридів є GaN, який широко використовується для виробництва світлодіодів, але реалізація всіх його позитивних властивостей в мікроелектроніці, так само як у випадку AlN і InN, не досягнута. Можливість створення оптоелектронних приладів на основі AlN, використання якого може дозволити створити лазер, який працює в діапазоні глибокого ультрафіолету (~200 нм) теж лише досліджується.

Викладення основного матеріалу. Велика ширина забороненої зони обумовлює високі поля лавинного пробію в GaN і AlN, що дозволяє використовувати вказані напівпровідники для створення потужних НВЧ приладів, здатних працювати при підвищених потужностях і температурах. Висока температурна провідність AlN, яка перевищує провідність SiC, дозволяє ефективно відводити тепло від працюючого приладу без використання додаткового тепловідводу. Епітаксійні шари нітридів галію та індію для ефективнішого відводу тепла можливо вирощувати на підкладці SiC. До недавнього часу InN залишалось найменш вивченим через труднощі його отримання, обумовлені низькою температурою дисоціації й високим рівноважним тиском InN, який підвищується з ростом температури [2]. Перевагою InN є висока рухливість носіїв $4,2 \cdot 10^7$ см/с, що робить цей матеріал перспективним для створення високошвидкісних напівпровідникових приладів, терагерцових емітерів і детекторів і високоефективних сонячних батарей.

Таблиця 1

Параметри напівпровідників [1, 3, 4]

Параметр	InN[3]	AlN[4]	GaN[3]		GaAs[3]	SiC[3]	Si[3]
			вюрцит	цинк. обм.			
Ширина забороненої зони E_g , еВ	0,7[1]	6,2	3,51	3,3	1,42	3,25	1,12
Поле лавинного пробію E_B , МВ/см	–	11,7	5	5	0,4	3	0,25
Рухливість електронів μ , см ² /(В·с)	3200	1100	1300	1000	6000	800	1350
Максимальна швидкість v_s , $\cdot 10^7$ см/с	3,4	1,85	3	3	2	2	1
Температурна провідність χ , Вт/(см·К)	0,45	3,4	>2,1	>2,1	0,5	4,9	1,5
Діелектрична стала, ϵ	15,3	9,14	8,9-9,5	9,7	12,8	9,7	11,8

Обмежуючим фактором для використання тринітридів в мікроелектроніці є труднощі вирощування і отримання об'ємних матеріалів стехіометричного складу через високу енергію зв'язку атомів, яка у випадку GaN сягає 9,12 еВ/атом [5]. Внаслідок цього GaN, AlN і InN вирощують на чужорідних підкладках (Al₂O₃, SiC, Si), що призводить до значної густини дефектів в напівпровіднику внаслідок релаксації внутрішніх механічних напруг внаслідок релаксації внутрішніх механічних напруг, що виникають через відмінність параметрів ґраток і коефіцієнтів термічного розширення напівпровідника і підкладок, на яких він вирощується.

Також обмежуючим фактором для використання тринітридів в мікроелектроніці є потреба в термостійких надійних омичних контактів. Як показують результати досліджень [6–9], для створення таких контактів провідне значення має стабільність їх шарової структури і відсутність неконтрольованого масопереносу під дією деградуючих факторів, таких як підвищені температури, електромагнітні поля й іонізуючі опромінення. Для цього необхідно використовувати багатошарові контактні структури з контактоутворюючими шарами, дифузійним бар'єром за який виступають тугоплавкі метали та їх сполуки, і контактуючим шаром який використовується для контакту з підвідними провідниками для чого частіше використовують золото [6, 8, 9].

Ми досліджували омичні контакти до монокристалічних плівок n-GaN і n-AlN, отриманих в ФТІ ім. А.Ф. Йоффе РАН за методом хлоридної газозфазної епітаксії на установці з горизонтальним реактором [10]. Шари GaN товщиною ~30 нм з концентрацією донорів $>10^{18} \text{ см}^{-3}$ були вирощені на AlN, вирощеному на сапфірі. Шари AlN товщиною ~3,5 нм з концентрацією донорів $<10^{17} \text{ см}^{-3}$ були вирощені на сильнолегованій p^+ підкладці SiC. Рентгенодифракційні дослідження шарів AlN показали, що середня лінійна густина дислокацій в них складає $\sim 10^5 \text{ см}^{-1}$. Епітаксійні шари n-InN з концентрацією носіїв $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$ товщиною 570 нм вирощені методом молекулярно-променевої епітаксії з плазмовою активацією на підкладці Al_2O_3 , вкритою буферним шаром GaN товщиною 880 нм. За рахунок розбіжностей в параметрах ґраток сформовані шари напівпровідників характеризуються значною концентрацією дефектів, що проявляється в формуванні колончастої структури напівпровідника, яку показано на прикладі контактної структури Au-Pt-Ti-n-InN/GaN/ Al_2O_3 (рис. 1).

Омичні контакти були створені на ДП НДІ "Оріон" за методом послідовного вакуумного напилення шарів металізації Au(100 нм)-Pd(70 нм)-Ti(50 нм)-Pd(30 нм) на підігріту до 350 °C підкладку n-AlN і n-GaN з подальшим формуванням контактів за допомогою швидкої термічної обробки (ШТО) за $T = 900 \text{ °C}$ тривалістю 30 с. В структурі Au-Pd-Ti-Pd-n-GaN омичний контакт був отриманий як на підігрітій до 350 °C підкладці, так і після ШТО. Для невідпалених контактних структур Au-Pd-Ti-Pd-n-AlN характерні випрямляючі ВАХ. Після ШТО за $T = 900 \text{ °C}$ тривалістю 30 с були отримані лінійні симетричні ВАХ, що свідчить про формування омичного контакту. З результатів рентгенодифракційних досліджень видно, що формування омичних контактів до n-GaN і n-AlN відбувається за рахунок формування фаз Ti_2AlN , Al_3Ti та AlTi_3 (рис. 2).

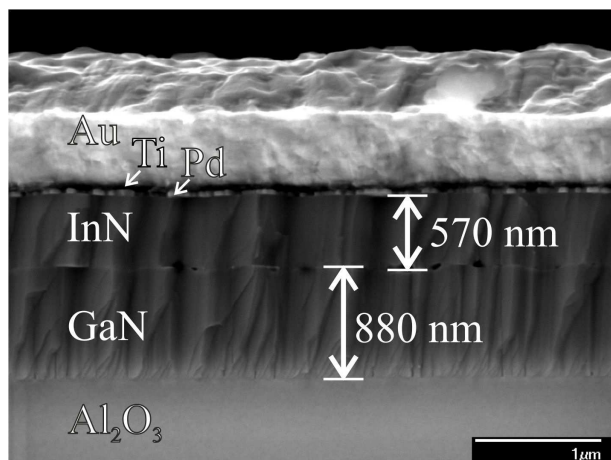


Рис. 1. Скол контактної структури Au-Pt-Ti-n-InN/GaN/ Al_2O_3

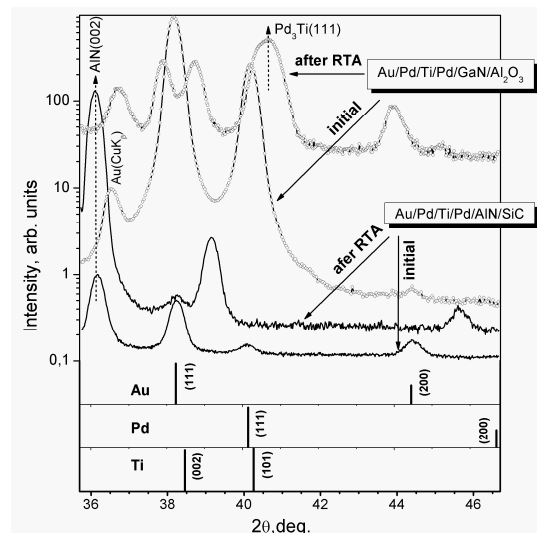


Рис. 2. Рентгенодифрактограма омичних контактів Au-Pd-Ti-Pd/AlN/SiC та Au-Pd-Ti-Pd/GaN/ Al_2O_3

Однією з основних величин, що характеризують омичний контакт, є його питомий контактний опір ρ_c . Ми досліджували ρ_c методом довгої лінії передачі (transmission line method – TLM) [11]. В омичному контакті Pd-Ti-Pd-Au до n-GaN і n-AlN величина ρ_c становила $1,5 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ і $0,32 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ відповідно. В контактній структурі Au-Pt-Ti-n-InN/GaN/ Al_2O_3 питомий контактний опір був рівним $1,7 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$. Порівняно високе значення питомого контактного опору у випадку контакту до n-AlN може бути обумовлено високим опором n-AlN.

При дослідженні залежності питомого контактного опору $\rho_c(T)$ омичних контактів Au-Pt-Ti-n-InN/GaN/ Al_2O_3 була виявлена нехарактерна залежність, яка полягала в зростанні величини ρ_c з температурою (рис. 3). Така залежність нехарактерна для класичних механізмів струмопереносу, таких як термоелектронна емісія, термопільова емісія і пільова емісія, при яких ρ_c зменшується з ростом температури або не залежить від температури, як у випадку пільової емісії. Також класичними механізмами струмопереносу не описуються залежності $\rho_c(T)$ в структурах Au-Pd-Ti-Pd-n-AlN і Au-Pd-Ti-Pd-n-GaN (рис. 3). У [12] такі характеристики пояснювались струмопереносом по шунтах, які

закорочують область просторового заряду, сформованими за рахунок сегрегації атомів металу на дислокаціях.

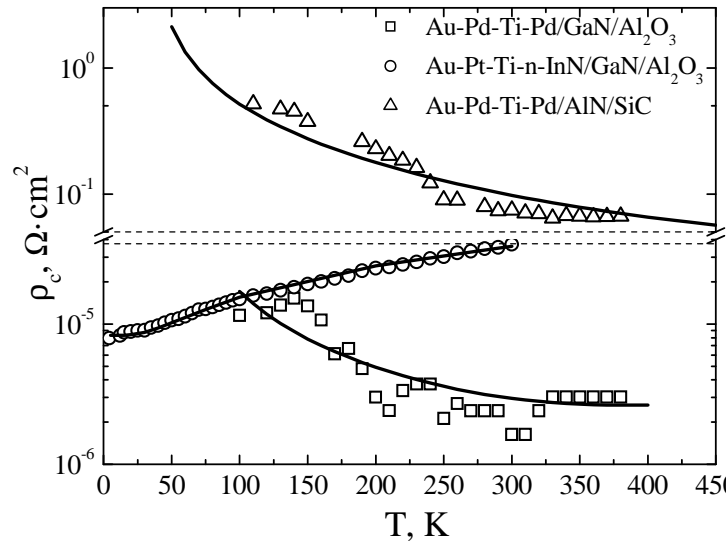


Рис. 3. Залежність питомого контактної опору від температури омичних контактів до n -AlN, n -GaN, n -InN

Отримані експериментальні залежності $\rho_c(T)$ вдалося описати за допомогою моделі струмопереносу по дислокаціях з обмеженням дифузійним підводом носіїв заряду, запропонованій в [12]. За цією моделлю питомий контактний опір визначається співвідношенням [12]:

$$\rho_c = \frac{\rho_{c0}}{\pi L_D^2 N_{D1}} = \frac{kT}{q \pi L_D^2 N_{D1}} \frac{\left(1 + \frac{V_T}{4D_n} e^{y_{c0}} \alpha L_D\right)}{\frac{qV_T}{4} N_d e^{y_{c0}}}, \quad (1)$$

де q – заряд електрона; V_T – середня теплова швидкість електронів, $y_{c0} = q\phi_{c0}/kT$ – рівноважний безрозмірний потенціал на межі розділу метал–напівпровідник; L_D – дебаївська довжина екранування; D_n – коефіцієнт дифузії електронів; α – числовий коефіцієнт порядку 1; N_d – концентрація донорів у напівпровіднику; N_{D1} – концентрація провідних дислокацій. Коефіцієнт дифузії з врахуванням співвідношення Ейнштейна дорівнює $Dn = kT\mu_n/q$, де рухливість електронів μ_n визначається з врахуванням розсіяння на заряджених домішках (μ_z), на оптичних коливаннях ґратки (μ_o) і на дислокаціях (μ_D):

$$\mu_n = (\mu_z^{-1} + \mu_o^{-1} + \mu_D^{-1})^{-1}. \quad (2)$$

Вказані у (2) рухливості можна описати за допомогою відповідних співвідношень [13]:

$$\mu_z(T) = \frac{3.68 \cdot 10^{20} \left(\frac{\epsilon_s}{16}\right)^2 \left(\frac{T}{100}\right)^{3/2}}{n_w \left(\frac{m}{m_0}\right)^{1/2} \log \left[1 + \left(\left(\frac{\epsilon_s}{16}\right) \left(\frac{T}{100}\right) \left(\frac{2.35 \cdot 10^{19}}{n_w}\right)^{1/3} \right)^2 \right]}; \quad (3)$$

$$\mu_o(T) = \frac{31.8 \sinh\left(\frac{\theta}{2T}\right)}{\left(\frac{1}{\epsilon_{sh}} - \frac{1}{\epsilon_{sl}}\right) (\theta)^{0.5} \left(\frac{m}{m_0}\right)^{1.5} \left(\frac{\theta}{2T}\right)^{1/2} K_1\left(\frac{\theta}{2T}\right)}; \quad (4)$$

$$\mu_D = \frac{B \exp(\eta)}{T^{1/2} N_{D2} L_D^5} K_2(\eta), \quad (5)$$

де θ – температура поздовжнього оптичного фонону; m – ефективна маса електрона; m_0 – маса електрона; ϵ_{sh} та ϵ_{sl} – відповідно високочастотна і низькочастотна діелектричні проникності напівпровідника; $K_1(\theta/2T)$ – модифікована функція Бесселя першого порядку; N_{D2} – концентрація розсіюючих дислокацій; $K_2(\eta)$ – модифікована функція Бесселя другого порядку; B – розмірний коефіцієнт, який визначається

співвідношенням $B = (\hbar^2 \epsilon_0 \epsilon_s c)^2 / (8\sqrt{2\pi k} q^3 \sigma^2 m^{5/2})$; $\sigma = -\lambda/2qc$; λ – лінійна густина заряду дислокаційної лінії; c – стала ґратки в напрямі [0001].

Описавши залежності $\rho_c(T)$ Au-Pd-Ti-Pd/GaN/Al₂O₃, Au-Pd-Ti-Pd/AlN/SiC та Au-Pt-Ti-n-InN/GaN/Al₂O₃, відповідно до запропонованої моделі [12], ми отримали густини провідних дислокацій $2,5 \cdot 10^9$ см⁻², 10^6 см⁻² і $3 \cdot 10^9$ см⁻² відповідно. Ці результати узгоджуються з результатами рентгенодифракційних досліджень.

Висновок. Отже, ми дослідили механізми формування омичних контактів до GaN, AlN і InN. Нами був виявлений та описаний струмоперенос по провідних дислокаціях з дифузійним обмеженням носіїв струму.

Список використаної літератури:

1. *Feng Z.C.* III-nitride semiconductor materials / *Z.C. Feng*. – Imperial College Press, Singapore, 2006. – 428 p.
2. *Давыдов В.Ю.* Электронные и колебательные состояния InN и твердых растворов In_xGa_{1-x}N / *В.Ю. Давыдов, А.А. Клочихин* // Физика и техника полупроводников. – 2004. – Т. 38, № 8. – С. 897–936.
3. Handbook Series on Semiconductor Parameters vol. 1,2 / edited by *M.Levinstein, S.Rumyantsev, M.Shur*. – World Scientific, London, 1996. – 1999 p.
4. *Kamata H.* Single-crystal growth of aluminum nitride on 6H-SiC substrates by an open-system sublimation method / *H.Kamata, K.Naoe, K.Sanada, N.Ichinose* // J. Cryst. Growth. – 2009. – V. 311. – Pp. 1291–1295.
5. *Annaig D.* Gallium nitride bulk crystal growth processes: a review / *D.Annai, G.Graziella, D.Gerard* // Mat. Sci. Eng. R. – 2006. – V. 50, N 6. – Pp. 167–194.
6. *Бланк Т.В.* Механизмы протекания тока в омических контактах металл—полупроводник : обзор / *Т.В. Бланк, Ю.А. Гольдберг* // ФТП. – 2007. – Т. 41, № 11. – С. 1281–1308.
7. *Васильев А.Г.* СВЧ транзисторы на широкозонных полупроводниках / *А.Г. Васильев, Ю.В. Колковский, Ю.А. Концевой*. – М. : Техносфера, 2011. – 256 с.
8. *Шеремет В.Н.* Особенности создания и электрофизические свойства омических контактов к нитриду галлия : обзор / *В.Н. Шеремет* // Оптоэлектроника и полупроводниковая техника. – 2009. – Т. 44. – С. 41–59.
9. *Noor Mohammad S.* Contact mechanisms and design principles for alloyed ohmic contacts to n-GaN / *S.Noor Mohammad* // J. Appl. Phys. – 2004. – V. 95, N 12. – Pp. 7940–7953.
10. *Жиляев Ю.В.* Рост слоев нитрида галлия методом хлоридной газофазной эпитаксии при пониженной температуре источника / *Ю.В. Жиляев, С.Н. Родин* // Письма в журнал технической физики. – 2010. – Т. 36, № 9. – С. 11–16.
11. *Шеремет В.Н.* Метрологические аспекты измерения сопротивления омических контактов / *В.Н. Шеремет* // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2010. – Т. 53, № 3. – С. 3–12.
12. Mechanism of contact resistance formation in ohmic contacts with high dislocation density / *A.V. Sachenko, A.E. Belyaev, N.S. Boltovets et al.* // Journal of Applied Physics. – 2012. – V. 111, N 8.
13. *Зеегер К.* Физика полупроводников / *К.Зеегер*. – М. : Мир, 1977. – 629 с.

ШЕРЕМЕТ Володимир Миколайович – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник Інституту фізики напівпровідник імені В.Є. Лашкарьова НАН України.

Наукові інтереси:

- дослідження контактів метал–напівпровідник до тринітрідів;
- розробка високочастотних приладів на основі тринітрідів.

САЙ Павло Олегович – стажер-дослідник Інституту фізики напівпровідник імені В.Є. Лашкарьова НАН України.

Наукові інтереси:

- дослідження контактів метал–напівпровідник до InN.

Стаття надійшла до редакції 18.04.2014