

**Я.Я. Кудрик**

## **МЕТОДИ СТВОРЕННЯ І ВЛАСТИВОСТІ ОМІЧНИХ КОНТАКТІВ ДО ФОСФІДУ ІНДІЮ (ОГЛЯД)**

Систематизовано результати дослідження питомого опору омічних контактів до фосфіду індію. Розглянуто методи формування, матеріали омічних контактів, міжфазні взаємодії у процесі термічного відпалу та вказано оптимальну температуру відпалу для кожного з розглянутих типів металізації. На основі проведеного аналізу дано рекомендації щодо оптимізації шарових структур омічного контакту в залежності від області його використання і необхідних параметрів.

**Ключові слова:** омічний контакт, фосфід індію, дифузійний бар'єр, температура відпалу, механізм струмоперенесення.

### **ВСТУП**

Фосфід індію, завдяки своїм перспективним фізичним параметрам (табл. 1), застосовується для створення широкого ряду приладів екстремальної мікроелектроніки. До них належать діоди Ганна терагерцового діапазону, НЕМТ і біполярні транзистори на гетеропереході, а також довгохвильові лазерні діоди. Такі прилади працюють при високих густинах струмів ( $1-10 \text{ кА/см}^2$ ) [1], що вимагає особливої уваги до якості та надійності омічних контактів. Підвищення термічної стійкості, зниження питомого контактного опору та покращення однорідності межі поділу омічних контактів є важливим фізико-технологічним завданням, вирішення якого необхідне для покращення параметрів фосфід-індієвих приладів.

*Омічний контакт* – це контакт, котрий має лінійну симетричну вольт-амперну характеристику (ВАХ) в робочому діапазоні струмів. Основними характеристиками омічного контакту є питомий контактний опір та його температурна залежність, максимальна робоча температура. Крім низького контактного опору, контакт повинен мати також ряд інших важливих якостей, а саме:

- контакт повинен бути термічно стабільним: у робочому діапазоні температур мають бути відсутніми міжфазні реакції та дифузійне розмиття шарової структури;
- контакт має бути стійким до впливу робочих густин струмів (що особливо важливо для потужних діодів Ганна і лавинно-пролітних діодів);
- контакт також повинен бути стабільним і стосовно інших спеціальних деградаційних факторів, що можуть проявлятися під час його експлуатації (іонізуюче, мікрохвильове та ультразвукове випромінювання);
- механічні напруженості в металічних шарах повинні бути мінімізованими;
- межа поділу контакт-напівпровідник повинна бути однорідною;
- процеси виготовлення повинні бути сумісними із загальною схемою виготовлення самого пристрою.

Виконання всіх цих вимог до технологічного процесу виготовлення омічного контакту є значною проблемою. Технологія виготовлення омічного контакту, зазвичай, це набір компромісних рішень між адгезією і дифузійною проникністю дифузійного бар'єра, між величиною контактного опору і товщиною перехідного шару, температурною стабільністю і т. ін. У залежності від призначення контакту і вимог до його параметрів він може складатися з одного або декількох шарів, що мають різні функціональні значення:

Таблиця 1. Параметри напівпровідникових матеріалів при 300 К [2, 3].

Параметр	Si	GaAs	4H-SiC	InP	GaP	GaN	Алмаз
Ширина забороненої зони $E_g$ , eВ	1,12	1,43	3,26	1,344	2,2	3,45	5,45
Критична напруженість електричного поля $E_C$ , $\times 10^6$ В/см	0,29	0,4	2,4	0,5	1,0	3,3	10
Рухливість електронів $\mu_n$ , $\text{cm}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	1350	8500	880	5400	250	1000	2200
Рухливість дірок $\mu_p$ , $\text{cm}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	490	400	80	200	150	30	1800
Дрейфова швидкість, насичення, $v_{sat}$ , $\times 10^7$ см/с	1,0	2,0	2,0	0,9	1,5	2,5	1,5
Теплопровідність $\lambda$ , Вт/см·град	1,3	0,55	4,0	0,68	0,7	1,7	10
Діелектрична проникність, $\epsilon_s$	11,9	13,1	10,1	12,5	11,1	8,9	5,7
Температура Дебая, К	645	360	1300	425	445	600	1860

*підлегує шар* – тонкий шар між напівпровідником і контактоутворюючим шаром, який в процесі відпалу, дифундує, створює у приповерхневому шарі напівпровідника підвищену концентрацію для стимулювання тунельного механізму струмоперенесення в контакт, що веде до зниження контактного опору.

*контактоутворюючий шар* – шар металу, сплаву або сполуки, що формує потенціальний бар'єр з напівпровідником;

*адгезійний шар* – тонкий, зазвичай, металічний шар між антидифузійним і контактоутворюючим шарами або між контактоутворюючим і зовнішнім шарами металізації, він слугує для підвищення змочування нижнього шару матеріалом, який наноситься після адгезійного шару, та для підвищення механічної міцності контакту, попереджуючи деламінацію (розшарування);

*дифузійний бар'єр* – шар, що запобігає взаємодифузії між контактоутворюючим і зовнішнім шарами металізації [4, 5, 21];

*шар зовнішньої металізації* – шар, призначений для утворення зв'язків між елементами інтегральної схеми, контактопідводів та ін.

При формуванні омичного контакту до широкозонного напівпровідника, як правило, використовують такі концепції та їх комбінації:

- По-перше, можливий такий підбір робіт виходу в матеріалах контакту, щоб для напівпровідника  $n$ -типу робота виходу електронів з металу або сполуки, яка утворилася в процесі відпалу,  $\phi_m$ , повинна бути меншою ніж робота виходу з напівпровідника,  $\phi_s$ , а між металом і напівпровідником  $p$ -типу провідності  $\phi_m > \phi_s$ . Однак це співвідношення істинне за умови, коли перехідний шар відсутній і густина поверхневих станів на межі поділу порівняно низька. При високих же рівнях густин поверхневих станів відбувається фіксація рівня Фермі і висота бар'єра слабо залежить від  $\phi_m$ , що і відповідає межі Бардіна. Густину поверхневих станів значною мірою можна змінювати за допомогою технологічних обробок напівпровідникової пластини до і після нанесення омичного контакту. Іншими словами, сукупність технологічних умов підготовки поверхні напівпровідника, способів нанесення і параметрів відпалу значною мірою може визначати питомий контактний опір [6, 7].

- По-друге, можливе епітаксіальне нарощування шару напівпровідника з екстремально низькою шириною забороненої зони, наприклад, для InP ширина забороненої зони дорівнює 1,34 eВ, а для InAs – 0,35 eВ. Особливістю InAs є також і те, що поверхневі стани закріплюють рівень Фермі практично в зоні провідності, що дозволяє використовувати для формування омичного контакту практично будь-який метал [8].

- По-третє, екстремальне легування тонкого приповерхневого шару напівпровідника для забезпечення умови тунелювання струму. Це може бути реалізовано двома способами. Один з методів містить у собі вирощування сильнолегованого епітаксіального шару на напівпровіднику перед осадженням металу. Дуже часто епітаксіальний шар являє собою матеріал із забороненою зоною нижчою, ніж у напівпровідника, наприклад, такий, як

Таблиця 2. Розчини для очистки підкладок InP [8-107, 111].

Розчин	$T, ^\circ\text{C}$	Час	Опис
$\text{H}_2\text{O}:\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2$ (5:1:1)	75	5 хв	RCA SC1
$\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ (3:1:1)	25	1–5 хв	травлення
$\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_3\text{PO}_4:\text{H}_2\text{O}$ (2:6:3)			травлення
$\text{CH}_3\text{CNOHCOOH}:\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O}$ (1,5:1:2)			травлення
$\text{HF}:\text{H}_2\text{O}$ (1:10)	25		розчин HF (DHF)
$\text{HCl}:\text{H}_3\text{PO}_4$ (1:1)			травлення $\text{SiO}_2$ ; 2,6 мкм/хв

$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  (~0,75 eV), сумірний з ґратковою структурою напівпровідника, або градієнтний варизонний шар [9]. У теорії виготовлення цих контактів не вимагає відпалу, і тому вони називаються *несплавними контактами*. Однак на практиці більшість з них піддаються додатковому відпалу для досягнення мінімального контактного опору і максимальної температурної стабільності. Інший спосіб отримання легованих приповерхневих шарів – це легування поверхні із зовнішнього джерела легуючої домішки. Легуюча домішка, як правило, вводиться у напівпровідник за допомогою дифузії, що вимагає значного нагрівання контакту. Ці контакти називають сплавними контактами. Легування може бути досягнуто також і іонною імплантацією відповідних видів, проте це призводить до таких проблем, як пошкодження поверхні і втрата стехіометрії [10].

*Базова технологія* створення омичного контакту містить підготовку поверхні напівпровідникової пластини, пошарове нанесення матеріалів контакту з його подальшим відпалом.

*Підготовка напівпровідникової пластини*, зазвичай, полягає у попередньому очищенні її за методикою, подібною до RCA (табл. 2). RCA (аббревіатура означає назву фірми) – стандартний набір технологічних операцій з очищення напівпровідникових пластин, що включає три етапи: видалення органічних забруднень (SC1), видалення оксидів (SC2) і видалення іонних залишків (SC3).

Перший етап очищення напівпровідникових пластин фосфіду індію перед нанесенням контактів – розчинення органічних забруднень – виконують органічними розчинниками, це етап SC1 (див. табл. 2). Для другого етапу очищення найчастіше використовують розчин  $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ . Третій етап очищення – промивання деіонізованою водою. У ролі маски для фотолітографії використовують напилені чи вирощені CVD методами шари  $\text{SiO}_2$  або  $\text{Si}_3\text{N}_4$ .

## ОМІЧНІ КОНТАКТИ ДО $n\text{-InP}$

Розподіл величин контактної опору від концентрації легування фосфіду індію у контактах до  $n\text{-InP}$ , побудований на основі аналізу літературних даних [8-108], подано на рис. 1. Суцільною лінією на рисунку зображено криву мінімального контактної опору, розрахованого авторами [120] у припущенні реалізації термоелектронного, термопольового та тунельного механізмів струмоперенесення в контакт. Бачимо, що деякі експериментальні значення контактних опорів лежать нижче кривої мінімального контактної опору, що може свідчити про реалізацію в них нетипових механізмів струмоперенесення на зразок внеску «патчів» за теорією Танга [109] або шунтування за теорією Гольдберга [32]. Для підлеглих шарів до  $n\text{-InP}$  найчастіше використовують Ge, Sn, Si. Як матеріал для адгезійного та одночасно контактоутворюючого шару часто використовують золото, паладій, нікель, платину і титан (див. табл. 3). Розглянемо різні типи таких контактів детальніше.

### Контактоутворюючі шари на основі Au та евтектики AuGe

У виробництві для створення омичного контакту найчастіше наносять шари золота та германію або золотогерманієву евтектику. Інколи шар германію наносять після шару золота, так що спочатку шар германію дифундує в золото, утворюючи золотогерманієву евтектику, і лише потім проникає у напівпровідник, підлеговуючи його [11]. Оскільки Ge є донором в InP, передбачалося, що контакт формується за рахунок заміщення In в кристалічній ґратці. Проте можливий і додатковий механізм утворення контакту: різними авторами спостережено утворення тернарної фази AuGeP на межі поділу і показано, що ця фаза фактично знижує висоту бар'єра до 0,15 eV, що безперечно відіграє важливу роль у формуванні контакту. Оптимальними температурами відпалу металізації є 350–375 °С. Одним із недоліків золотогерманієвої евтектики як контактоутворюючого матеріалу є наявність великої кількості міжфазних реакцій з утворенням нових фаз. Наслідками чого є значною мірою неоднорідна межа поділу контакт-напівпровідник, недостатня температурна стабільність, неоднорідне травлення, що спричиняють погану морфологію країв контактів при фотолітографії, тенденції до утворення спайок і т. ін. [8]. Перевагою золотогерманієвої евтектики в контакті до InP є створення одного з найнижчих серед розглянутих матеріалів контактного опору, що і зумовлює його популярність у виробників мікроелектронних приладів [8].

Таблиця 3. Види омичної металізації до n-InP.

Контактна металізація	Товщини, нм	$N_d, \text{см}^{-3}$	$T_{\text{ШТВ}}, \text{°C}$	$t_{\text{ШТВ}}, \text{хв}$	$\rho_c, \text{Ом}\cdot\text{см}^2$	Посилання
Ti/Pt	50/75	$6 \cdot 10^{17}$	без відпалу		$1,8 \cdot 10^{-6}$	[19]
Ge/Au/Ti/Au	45/80/50/300	$1 \cdot 10^{18}$	480	1,5	$4 \cdot 10^{-7}$	[20]
Ge/Au/Ni/Ti/Au	45/80/25/50/300	$1 \cdot 10^{18}$	440	1,5	$1,3 \cdot 10^{-7}$	[20]
AuGe/TiB <sub>2</sub> /Au		$1 \cdot 10^{18}$	400		$2,2 \cdot 10^{-5}$	[21]
Ni/AuGe/Ru/Au			400	0,5	$10^{-7}$	[22]
Ni/Ge/Au/Ti/TiN/ Ti/Au	25/50/80/5/100/5/200	$3 \cdot 10^{18}$	375	0,25	$3,0 \cdot 10^{-5}$	[23]
Pt/Si/Au	130/75/200	$2 \cdot 10^{18}$	550	0,5	$3,32 \cdot 10^{-5}$	[33]
Pt/Ge/Pt/Ge	10/10/40/80	$2 \cdot 10^{18}$	500	0,5	$1 \cdot 10^{-5}$	[36]
Ge/Au/Ni		$3 \cdot 10^{16}$	325	5	$3 \cdot 10^{-5}$	[57]
Au	200	$1,0 \cdot 10^{18}$	400	1	$5,0 \cdot 10^{-5}$	[25]
(Au-Ge)	300	$3,0 \cdot 10^{18}$	375	0,5	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[45]
(Au-Ge)/Au	100	$1,7 \cdot 10^{17}$	420	0,5		[20]
(Au-Ge)/Au		$1,6 \cdot 10^{18}$		0,5		[47]
(Au-Sn)	250	$3,0 \cdot 10^{18}$	390	0,5	$1,8 \cdot 10^{-6}$	[46]
Ge/Au/Ti/Au	45/80/50/300	$1,0 \cdot 10^{18}$	480	1	$4,0 \cdot 10^{-7}$	[25]
(Au-Ge)/Ni	150/30	$8,0 \cdot 10^{17}$	350	0,5		[25]
(Au-Ge)/Ni	125/25		375	3	$8,0 \cdot 10^{-6}$	[25]
Ge/Au/Ni	20/40/140	$1,7 \cdot 10^{18}$	400	20	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[25]
Au/Ge/Ni	40/20/140	$1,7 \cdot 10^{18}$	400	5	$1,0 \cdot 10^{-8}$	[11]
Ge/Au/Ni	50/500/5	$1,0 \cdot 10^{15}$	330	15	$1,5 \cdot 10^{-6}$	[25]
Ge/Au/Ni	50/500/5	$1,0 \cdot 10^{15}$	390	15	$1,5 \cdot 10^{-6}$	[68]
(Au-Ge)/Ni/Au	60/15/40	$2,0 \cdot 10^{18}$	430	0,003	$2,0 \cdot 10^{-7}$	[25]
(Au-Ge)/Ni/Au	60/15/40	$2,0 \cdot 10^{18}$	450	0,003	$2,0 \cdot 10^{-7}$	[25]
(Au-Ge)/Ni/Au	50/75/100		450	0,4	$8,0 \cdot 10^{-7}$	[25]
Ni/Ge/Au	25/50/40	$1,0 \cdot 10^{17}$	400	0,17	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[10]
Ni/Au/Ge/Ni	25/50/25/5	$7,0 \cdot 10^{15}$	450	1	$1,0 \cdot 10^{-4}$	[25]
(Au-Ge)/Ni	300/70	$8,0 \cdot 10^{17}$	350	2	$1,2 \cdot 10^{-6}$	[25]
(Au-Ge)/Ni	300/70	$8,0 \cdot 10^{17}$	400	2	$1,2 \cdot 10^{-6}$	[25]
Ni/(Au-Ge)/Ni	40/300/70	$8,0 \cdot 10^{17}$	400	2	$2,3 \cdot 10^{-6}$	[12]
Pd/Ge	50/115	$5,3 \cdot 10^{18}$	300		$1,27 \cdot 10^{-5}$	[12]
Pd/Ge/Au	25/50/40	$1,0 \cdot 10^{17}$	300		$2,5 \cdot 10^{-6}$	[30]
Pd/Ge/Au	25/50/40	$1,0 \cdot 10^{17}$	375		$2,5 \cdot 10^{-6}$	[30]
Pd/Ge/Pd	10/5/25	$1,0 \cdot 10^{17}$	400		$1,0 \cdot 10^{-5}$	[30]

Контактна металізація	Товщини, нм	$N_d, \text{см}^{-3}$	$T_{\text{ШТВ}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{ШТВ}}, \text{хв}$	$\rho_c, \text{Ом}\cdot\text{см}^2$	Поси- лання
Pd/Ge/Pd	11/5/25	$1,0\cdot 10^{17}$	425		$1,0\cdot 10^{-5}$	[30]
Pd/Ge	30/50	$1,0\cdot 10^{17}$	400		$6,0\cdot 10^{-6}$	[30]
Pd/Ge	30/50	$1,0\cdot 10^{17}$	450		$6,0\cdot 10^{-6}$	[30]
Ni	200	$1,7\cdot 10^{18}$	400		$3,0\cdot 10^{-7}$	[32]
NiP	100	$8,0\cdot 10^{18}$	напилення		$3,0\cdot 10^{-6}$	[12]
Pd		$1,0\cdot 10^{18}$	нанесення при 300–350 °C		$5,0\cdot 10^{-7}$	[30]
Au/Ni/AuGe/ $n^+$ -InP	50/25/100	$6,0\cdot 10^{18}$	320	0,33	$3,7\cdot 10^{-5}$	[61]
Au/Ni/AuGe/ $n^+$ -InP	50/25/100	$6,0\cdot 10^{18}$	370	0,33	$6,2\cdot 10^{-7}$	[61]
Au/Ni/AuGe/ $n^+$ -InP	50/25/100	$6,0\cdot 10^{18}$	400	0,33	$1,1\cdot 10^{-7}$	[61]
Au/Ni/AuGe/ $n^+$ -InP	50/25/100	$6,0\cdot 10^{18}$	420	0,33	$7,3\cdot 10^{-8}$	[61]
Au/Ni/AuGe/ $n^+$ -InP	50/25/100	$6,0\cdot 10^{18}$	440	0,33	$7,4\cdot 10^{-8}$	[61]
Au/Ni/AuGe/ $n^+$ -InP	50/25/100	$6,0\cdot 10^{18}$	500	0,33	$1,5\cdot 10^{-7}$	[61]
Au/Ni/AuGe/ $n$ -InP	50/25/100	$5,0\cdot 10^{15}$	300	0,33	$6,4\cdot 10^{-3}$	[61]
Ge/Au/Ni		$3\cdot 10^{16}$	325	5	$3\cdot 10^{-5}$	[56]
AuGe/Ni/Au		$8\cdot 10^{18}$	425	0,35	$7\cdot 10^{-8}$	[61]
Au/Ni/AuGe/ $n$ -InP	50/25/100	$5,0\cdot 10^{15}$	350	0,33	$1,39\cdot 10^{-2}$	[61]
Au/Ni/AuGe/ $n$ -InP	50/25/100	$5,0\cdot 10^{15}$	400	0,33	$1,62\cdot 10^{-4}$	[61]
Au/Ni/AuGe/ $n$ -InP	50/25/100	$5,0\cdot 10^{15}$	440	0,33	$7,1\cdot 10^{-5}$	[61]
Au/Ni/AuGe/ $n$ -InP	50/25/100	$5,0\cdot 10^{15}$	500	0,33	$1,5\cdot 10^{-4}$	[61]
Au/Ni/Au/ $n^+$ -InP	50/25/100	$6,0\cdot 10^{18}$	320	0,33	$2,3\cdot 10^{-5}$	[61]
Au/Ni/Au/ $n^+$ -InP	50/25/100	$6,0\cdot 10^{18}$	370	0,33	$1,4\cdot 10^{-6}$	[61]
Au/Ni/Au/ $n^+$ -InP	50/25/100	$6,0\cdot 10^{18}$	400	0,33	$1,42\cdot 10^{-6}$	[61]
Au/Ni/Au/ $n^+$ -InP	50/25/100	$6,0\cdot 10^{18}$	420	0,33	$8,5\cdot 10^{-7}$	[61]
Au/Ni/Au/ $n^+$ -InP	50/25/100	$6,0\cdot 10^{18}$	440	0,33	$2,5\cdot 10^{-6}$	[61]
Au/Ni/Au/ $n^+$ -InP	50/25/100	$6,0\cdot 10^{18}$	500	0,33	$1,5\cdot 10^{-5}$	[61]
Au/Cr/AuGe/ $n^+$ -InP	50/25/100	$6,0\cdot 10^{18}$	300	0,33	$3,4\cdot 10^{-6}$	[61]
Au/Cr/AuGe/ $n^+$ -InP	50/25/100	$6,0\cdot 10^{18}$	350	0,33	$1,6\cdot 10^{-6}$	[61]
Au/Cr/AuGe/ $n^+$ -InP	50/25/100	$6,0\cdot 10^{18}$	400	0,33	$4,8\cdot 10^{-7}$	[61]
Au/Cr/AuGe/ $n^+$ -InP	50/25/100	$6,0\cdot 10^{18}$	420	0,33	$1,2\cdot 10^{-6}$	[61]
Au/Cr/AuGe/ $n^+$ -InP	50/25/100	$6,0\cdot 10^{18}$	440	0,33	$9,3\cdot 10^{-7}$	[61]
Au/Cr/AuGe/ $n^+$ -InP	50/25/100	$6,0\cdot 10^{18}$	465	0,33	$1,11\cdot 10^{-6}$	[61]
Au/Cr/AuGe/ $n^+$ -InP	50/25/100	$6,0\cdot 10^{18}$	500	0,33	$4,0\cdot 10^{-6}$	[61]
Au/Cr/AuGe/ $n$ -InP	50/25/100	$5,0\cdot 10^{15}$	300	0,33	$2,28\cdot 10^{-3}$	[61]
Au/Cr/AuGe/ $n$ -InP	50/25/100	$5,0\cdot 10^{15}$	350	0,33	$8,0\cdot 10^{-4}$	[61]
Au/Cr/AuGe/ $n$ -InP	50/25/100	$5,0\cdot 10^{15}$	400	0,33	$3,9\cdot 10^{-4}$	[61]
Au/Cr/AuGe/ $n$ -InP	50/25/100	$5,0\cdot 10^{15}$	440	0,33	$3,5\cdot 10^{-4}$	[61]
Au/Cr/AuGe/ $n$ -InP	50/25/100	$5,0\cdot 10^{15}$	500	0,33	$1,6\cdot 10^{-4}$	[61]
Ag	200	$1,7\cdot 10^{18}$	300	0,5	$1,0\cdot 10^{-6}$	[38]
Ag	200	$1,7\cdot 10^{18}$	450	0,5	$1,0\cdot 10^{-6}$	[38]
Pd		$1,0\cdot 10^{18}$	300		$7,0\cdot 10^{-5}$	[12]
Pd		$1,0\cdot 10^{18}$	350		$7,0\cdot 10^{-5}$	[12]
Pd		$1,0\cdot 10^{18}$	300		$5,0\cdot 10^{-7}$	[14]
Pd		$1,0\cdot 10^{18}$	350		$5,0\cdot 10^{-7}$	[15]
Pd/Ge	50/115	$5,3\cdot 10^{18}$	300		$1,27\cdot 10^{-5}$	[16]
Pd/Ge/Pd	10/5/25	$1,0\cdot 10^{17}$	425	3	$1,0\cdot 10^{-5}$	[12]
Pd/Ge/Pd	10/20/25	$1,0\cdot 10^{17}$	400		$4,2\cdot 10^{-6}$	[12]
Pd/Ge/Pd	10/20/25	$1,0\cdot 10^{17}$	450		$4,2\cdot 10^{-6}$	[12]
Ni		$1,0\cdot 10^{18}$	350		$1,0\cdot 10^{-6}$	[14]
Ni		$2,0\cdot 10^{18}$			$3,0\cdot 10^{-6}$	[17]
Ni <sub>2</sub> P	100	$8,0\cdot 10^{18}$	напилення		$3,0\cdot 10^{-6}$	[17]
Ti/Pt/Au	50/60/500	$1,0\cdot 10^{18}$			$8,0\cdot 10^{-6}$	[11]
Ti/Pt	50/60	$6,0\cdot 10^{18}$			$8,0\cdot 10^{-7}$	[18]
Ti/Pt	50/60	$6,0\cdot 10^{18}$	без відпалу		$3,0\cdot 10^{-7}$	[19]
Ti/Pt	50/75	$6,0\cdot 10^{17}$			$1,0\cdot 10^{-5}$	[30]

### **Контактоутворюючі шари на основі Ag**

З аналізу міжфазних взаємодій випливає, що ця система дуже схожа на добре відому систему Au-InP, хоча існують деякі фундаментальні відмінності, наприклад, дифузія в контактну систему In, ефект інгібування реакції шаром SiO<sub>2</sub> і, найголовніше, формування шару фосфіду на межі метал-InP [38, 39]. Вважається, що низькі значення контактного опору в системі Ag-InP зумовлено наявністю шару AgP<sub>2</sub> на межі поділу метал-InP.

Через процеси дифузії межа поділу контакт-напівпровідник є досить неоднорідною, проте в роботі [38] показано, що можна досягти низьких значень контактного опору з одночасним обмеженням міжфазних реакцій шляхом введення тонкого шару AgP<sub>2</sub> між InP та розглянутою металізацією. Контактний опір зразків з одним лише шаром Ag досить високий, що свідчить про необхідність додаткового підлегуючого шару для зниження контактного опору. Температурна стабільність такого контакту нижча, ніж температурна стабільність контакту на основі золота, що не дає підстав для роботи з його оптимізації.

### **Контактоутворюючі шари на основі Pd**

Більш однорідної межі поділу метал-напівпровідник можна досягти, використовуючи паладій як контактоутворюючий матеріал [31]. Як видно з табл. 4, у паладієвому контакті з підлегуючим шаром германію при підвищенні температури до 250 °C відбуваються реакції утворення тернарної фази Pd<sub>2</sub>InP та фази PdGe. При підвищенні температури до 400 °C тернарна фаза розкладається з утворенням більш стабільних фаз PdIn та PdP<sub>2</sub>. Оптимальними температурами відпалу металізації є 350–375 °C у середовищі з наявністю кисню і до 450 °C у безкисневому середовищі. Для підвищення температурної стабільності необхідний дифузійний бар'єр, який перешкоджає би проникненню кисню вглиб контакту з утворенням оксидів германію, а також виходу In на поверхню з утворенням оксиду.

Таблиця 4. Фази, утворені компонентами фосфіду індію та контактної металізації під час термічного відпалу.

Фаза	Температура утворення, °C	Посилання
GeP	320	[44]
Au <sub>3</sub> Zn	420	[37]
AuIn	250	[12]
Au <sub>10</sub> In <sub>3</sub>	250–325	[10, 33]
AuGeInP	300–370	[61]
Au <sub>3</sub> In	400	[44]
Au <sub>2</sub> P <sub>3</sub>	400	[44]
Au <sub>9</sub> In <sub>4</sub>	420–450	[37, 44]
PdGe	250	[12]
Pd <sub>2</sub> InP	250	[12]
PdIn	400	[33]
PdP <sub>2</sub>	400	[33]
Ni <sub>2</sub> Ge	200–300	[61]
Ni <sub>2,7</sub> InP	200–250	[10, 63,70]
Ni <sub>2</sub> InP	300	[70]
Ni <sub>2</sub> P	300–325	[10, 63,70]
Ni <sub>3</sub> P	400	[11]
Ni <sub>6</sub> P <sub>5</sub>	420–450	[61]
Pt <sub>3</sub> InP	350	[72]
Pt <sub>3</sub> In	350	[72]
PtIn <sub>2</sub>	450	[72]
PtP <sub>2</sub>	450	[72]

## Контактоутворюючі шари на основі Ni

Високу температурну стабільність і порівняно низькі значення контактного опору можна отримати, використовуючи шар нікелю як контактоутворюючий. Як бачимо з табл. 4, у нікелевому контакті з підлегуєчим шаром германію при підвищенні температури до 200–300 °C відбуваються реакції утворення тернарної фази  $Ni_xInP$  та фази  $Ni_2Ge$  подібно до паладієвого контакту. При підвищенні температури до 300–325 °C тернарна фаза розкладається з утворенням фази  $Ni_2P$ , при підвищенні температури до 400 °C при коротких часах відпалу (3–20 хв) утворюється  $Ni_3P$ . У процесі таких реакцій утворюється вільний індій, котрий може дифундувати до поверхні контакту. Оптимальною температурою відпалу металізації є 400 °C. Однак, як показано авторами [12], фаза  $Ni_3P$ , відповідальна за створення низького потенціального бар'єра при температурах вищих за 400 °C, розкладається з утворенням  $Ni_2P$ , стійкого принаймні до температур 600 °C, що приводить до значного збільшення питомого контактного опору.

## Контактоутворюючі шари на основі Au/Ge/Ni, Au/Ge/Pd, Au/Ge/Cr

Зважаючи на те, що при формуванні контакту на основі золотогерманієвої евтектики утворюється недостатньо стійка фаза  $Au_2P_3$ , є спроби збільшення температурної стабільності контакту за використання добавок нікелю чи паладію, котрі утворюють більш стійкі фосфіди. Як бачимо з рис. 1, питомий контактний опір у таких системах мінімальний і нерідко нижчий за передбачений мінімально можливий контактний опір [100].

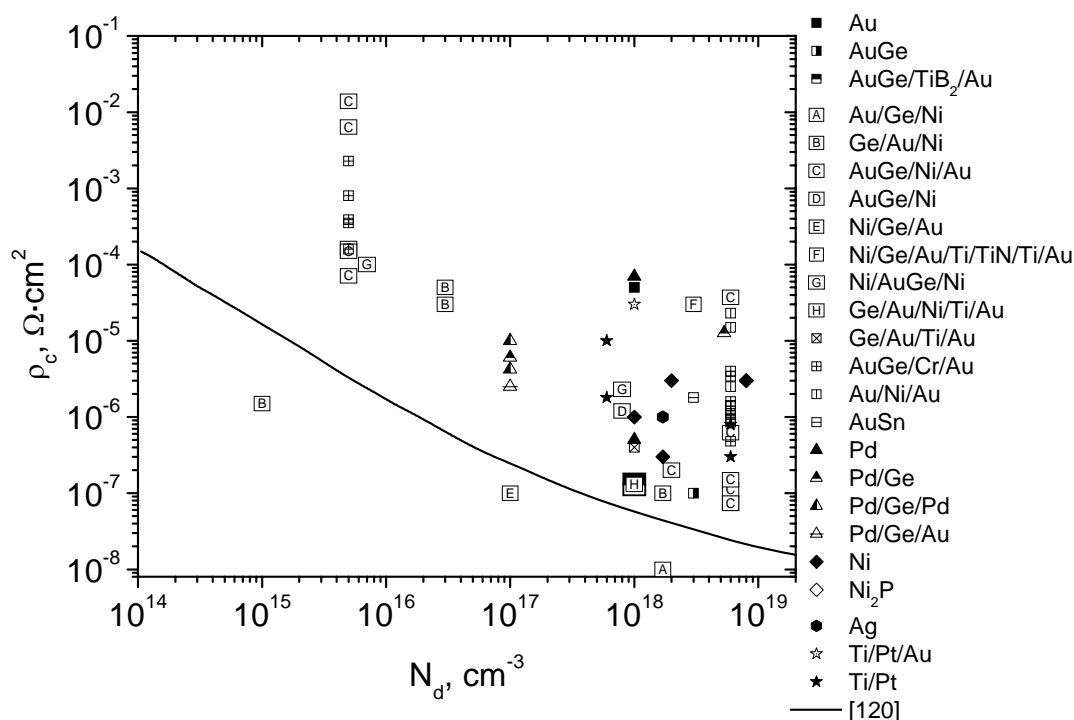


Рис. 1. Залежність  $\rho_c$  від рівня легування  $n$ -InP і типу металізації (див. табл. 2).

## ОМІЧНІ КОНТАКТИ ДО $p$ -InP

Акцепторами у фосфіді індію є домішки C, Hg, Zn, Cd, Si, Cu, Be, Mg, Ge, Mn. У ролі підлегуєчих шарів найчастіше використовують Zn, Be і Mg для формування омичних контактів до  $p$ -InP (рис. 2). При відпалі Zn утворює фази ZnP. Найкращих результатів контактного опору досягнуто на основі AuZn та AuBe контактної металізації (табл. 5).

Таблиця 5. Види омічної металізації до *p*-InP.

Контактна металізація	Товщини, нм	$N_a$ , см <sup>-3</sup>	$T_{штв}$ , °C	$t_{штв}$ , хв	$\rho_c$ , Ом·см <sup>2</sup>	Посилання
Au/Zn/Au	40/40/250	$5,5 \cdot 10^{18}$	420	3	$2,0 \cdot 10^{-3}$	[29]
Zn/Au	65/200	$1,0 \cdot 10^{16}$	430	6	$9,4 \cdot 10^{-3}$	[29]
Au/Zn/Au	20/40/270	$5,5 \cdot 10^{18}$	420	3	$1,8 \cdot 10^{-4}$	[29]
(Au-Be)	250	$5,5 \cdot 10^{18}$	460	3	$2,2 \cdot 10^{-4}$	[12]
(Au-Be)/Au	80/210	$1,0 \cdot 10^{18}$	420	10	$8,0 \cdot 10^{-5}$	[12]
(Au-Be)	100	$1,5 \cdot 10^{17}$			$1,0 \cdot 10^{-3}$	[12]
(Au-Be)		$1,3 \cdot 10^{18}$			$2,0 \cdot 10^{-4}$	[12]
(Au-Be)/Au	100/200	$5,5 \cdot 10^{17}$	420	3	$7,0 \cdot 10^{-4}$	[12]
(Au-Be)/Au		$2,0 \cdot 10^{18}$	420	3	$4,5 \cdot 10^{-4}$	[12]
Mn/Au	20/150	$2,0 \cdot 10^{18}$	450	0,25	$6,0 \cdot 10^{-4}$	[12]
Mg/Au	40/160	$6,0 \cdot 10^{17}$	446	50	$1,0 \cdot 10^{-4}$	[56]
Ni/Au	40/140	$2,0 \cdot 10^{18}$	400	0,5	$9,0 \cdot 10^{-4}$	[12]
AuBe/Cr/Au	60/50/300	$5,5 \cdot 10^{17}$	420	4	$1,0 \cdot 10^{-4}$	[26]
AuBe/Cr/Au		$2,0 \cdot 10^{18}$	420	3	$3,5 \cdot 10^{-4}$	[26]
AuBe/Cr/Au	80/20/200	$1,0 \cdot 10^{18}$	410	3	$5,0 \cdot 10^{-5}$	[26]
AuZn/TiW/Au	25/50/1000	$1,0 \cdot 10^{18}$	410	0,5	$3,7 \cdot 10^{-5}$	[27]
Pd/Zn/Pd/Au	10/5/20/60	$2,0 \cdot 10^{18}$	420	0,5	$7,0 \cdot 10^{-5}$	[45]
AuZn/Au	100/20	$5,0 \cdot 10^{18}$	350	0,33	13,7	[29]
AuZn/Au	100/20	$5,0 \cdot 10^{18}$	385	0,33	10,4	[29]
AuZn/Au	100/20	$5,0 \cdot 10^{18}$	400	0,33	$1,9 \cdot 10^{-2}$	[29]
AuZn/Au	100/20	$5,0 \cdot 10^{18}$	415	0,33	$3,5 \cdot 10^{-3}$	[29]
AuZn/Au	100/20	$5,0 \cdot 10^{18}$	425	0,33	$3,7 \cdot 10^{-4}$	[29]
AuZn/Au	100/20	$5,0 \cdot 10^{18}$	440	0,33	$1,4 \cdot 10^{-5}$	[29]
AuZn/Au	100/20	$5,0 \cdot 10^{18}$	450	0,33	$2,6 \cdot 10^{-5}$	[29]
AuZn	100/20	$5,0 \cdot 10^{18}$	400	0,33	4,4	[29]
AuZn	100/20	$5,0 \cdot 10^{18}$	430	0,33	$5,1 \cdot 10^{-5}$	[29]
AuZn	100/20	$5,0 \cdot 10^{18}$	440	0,33	$7,0 \cdot 10^{-6}$	[29]
AuZn	100/20	$5,0 \cdot 10^{18}$	465	0,33	$4,2 \cdot 10^{-5}$	[29]
AuZn	100/20	$5,0 \cdot 10^{18}$	500	0,33	$8,2 \cdot 10^{-5}$	[29]
Au/Ni/AuZn	50/25/100	$5,0 \cdot 10^{18}$	410	0,33	$1,14 \cdot 10^{-4}$	[61]
Au/Ni/AuZn	50/25/100	$5,0 \cdot 10^{18}$	415	0,33	$2,16 \cdot 10^{-4}$	[61]
Au/Ni/AuZn	50/25/100	$5,0 \cdot 10^{18}$	430	0,33	$2,7 \cdot 10^{-5}$	[61]
Au/Ni/AuZn	50/25/100	$5,0 \cdot 10^{18}$	440	0,33	$6,2 \cdot 10^{-4}$	[61]
Au/Ni/AuZn	50/25/100	$5,0 \cdot 10^{18}$	450	0,33	$8,0 \cdot 10^{-4}$	[61]
Au/Ni/AuZn	50/25/100	$5,0 \cdot 10^{18}$	465	0,33	$8,4 \cdot 10^{-4}$	[61]

### **Контактоутворюючі шари на основі Pt**

Міжфазні реакції при формуванні платиного контакту значною мірою подібні до реакцій фосфіду індію з паладієм (див. табл. 4). До температур відпалу 350 °C на межі поділу фосфід індію – платина утворюється аморфний шар, котрий росте зі збільшенням температури відпалу [72]. При температурах відпалу вищих за 350 °C починають утворюватись фази Pt<sub>3</sub>InP та Pt<sub>3</sub>In, причому фаза Pt<sub>3</sub>In з домішкою фосфору утворюється ближче до межі поділу і, ймовірно, є визначальною при формуванні висоти бар'єра. Збільшення температури до 450 °C приводить до формування фази PtP<sub>2</sub>, а подальше збільшення температури до 500 °C веде до утворення фаз Pt<sub>2</sub>In<sub>3</sub> та PtP<sub>2</sub>. У [73] розглянуто контакт Pt/Ti, у якому при  $T = 400$  °C спостерігалось утворення фази Ti<sub>x</sub>Pt<sub>y</sub>In<sub>2</sub> на межі поділу. Контакт був бар'єрним принаймні до температур відпалу 600 °C. Додавання цинку, на прикладі контакту Pt/Zn/Ti/Pt/Au, приводить до створення омічного контакту, який при відпалі 450 °C протягом 5 с мав мінімальний опір  $2 \cdot 10^{-5}$  Ом·см<sup>2</sup> при початковому легуванні InP  $4 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup> [80].



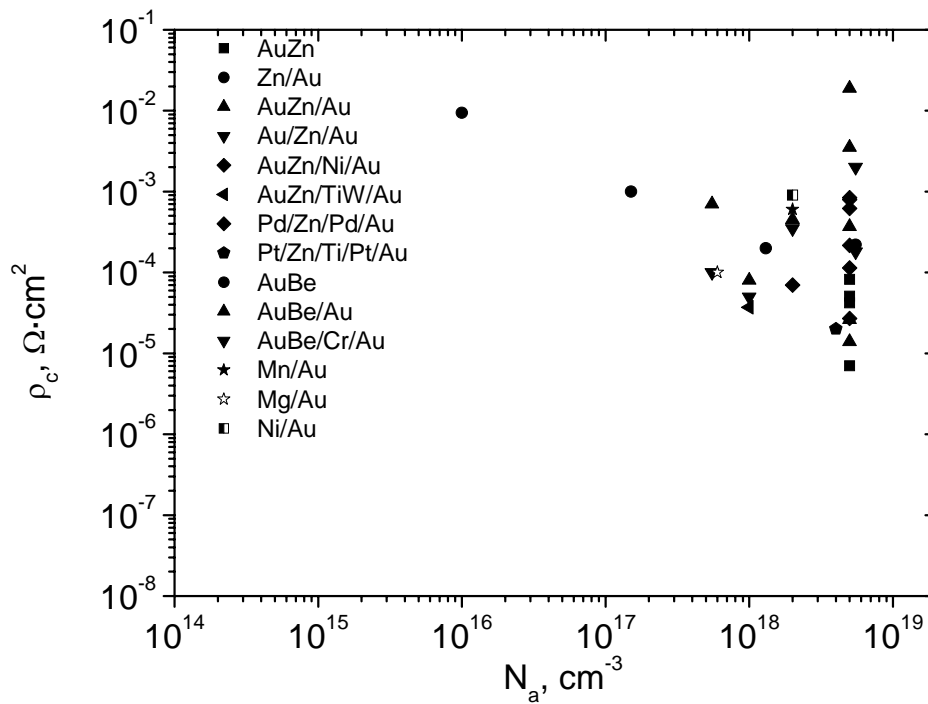


Рис. 2. Залежність  $\rho_c$  від рівня легування  $p$ -InP і типу металізації (див. табл. 5).

### ДИFUЗІЙНІ БАР'ЕРИ В ОМІЧНИХ КОНТАКТАХ ДО $p$ - ТА $n$ -InP

У ролі дифузійних бар'єрів в омічних контактах часто використовують полікристалічні шари тугоплавких металів та сплавів (Ni, Cr, Pt, Ru, TiW) [19, 22, 52, 69], аморфні шари силіцидів до  $n$ -InP (WSi) [4] та нанокристалічні шари боридів тугоплавких металів ( $TiB_2$ ,  $ZrB_2$ ) [5, 21, 79, 86, 94, 95, 97]. Так, у роботі [61] досліджено вплив дифузійного бар'єра на основі хрому на питомий опір контактів на основі Ni/AuGe як додаткового дифузійного бар'єра. Виявлено, що додавання хрому збільшує результуючий контактний опір приблизно у п'ять разів, що свідчить про його неефективність. У роботі [107] проведено порівняння контактів на основі Au/Ni/Ti та Au/Ru/Ti металізації. Показано, що після відпалу при 450 °C протягом 2 хв, оптимального щодо отримання мінімального контактного опору, дифузійний бар'єр на основі Ru забезпечує кращу стабільність та кращу морфологію поверхні. Відпал при вищих температурах збільшує контактний опір в обох контактних системах. У роботі [20] дифузійний бар'єр на основі Ru металізації використано для контактів на основі Ni/AuGe. Виявлено зменшення питомого контактного опору у порівнянні зі зразками без шару Ru. Мінімальний контактний опір досягнуто при швидкому термічному відпалі (ШТВ) за температури 400 °C. Дослідження дифузійних бар'єрів на основі Pd та Pt до контактів на основі Pd/Zn до  $p$ -InP було проведено авторами [52]. Показано, що дифузійний бар'єр на основі Pt більш ефективний щодо перешкоджання дифузії Zn, мінімальний контактний опір досягнуто при  $T_{ШТВ} = 400$  °C протягом 4 хв. Контакти з дифузійними бар'єрами на основі W, TiW, TiPt, Ta досліджено у роботах [4, 69]. Показано, що в тонких аморфних плівках W-Si та TiW-Si не спостерігається дифузії після 8 год відпалу при 450 °C, у той час як контакти з дифузійними бар'єрами на основі полікристалічних шарів TiPt деградують вже при відпалі 350 °C протягом 1 год. Контакти з наноструктурованими дифузійними бар'єрами на основі  $TiB_2$  досліджено у роботах [5, 21, 79, 86, 94, 95, 97]. Досліджено зв'язок між дифузійними властивостями плівок  $TiB_2$ ,  $ZrB_2$  та їх нанокристалічною структурою. Проведені дослідження показали, що дифузійні бар'єри не змінюють своїх властивостей принаймні до температур швидкого термічного відпалу 490 °C

протягом 1 хв. Дифузійні бар'єри на основі TiN досліджено в роботі [23]. Виявлено, що контакт Ni/Ge/Au/Ti/TiN/Ti/Au залишається стабільним після швидкого термічного відпалу при температурі 425 °С протягом 15 с.

Підсумовуючи, відмітимо, що перспективними матеріалами для створення надійних дифузійних бар'єрів для контактів до фосфіду індію є аморфні шари та нанокристалічно-аморфні композити на основі вольфраму та його інтерметалідів, а також боридів та нітридів тугоплавких металів.

### **НЕСПЛАВНІ ОМІЧНІ КОНТАКТИ ДО *p*- ТА *n*-InP**

У сучасних напівпровідникових приладах часто виникає необхідність в омічних контактах з тонкою межею поділу метал-напівпровідник. Стандартні металізації AuGeNi до *n*-InP та AuZn до *p*-InP для формування сплавних контактів виявляються малопридатними для таких цілей у результаті формування неоднорідної межі поділу значної товщини, часто зі спайками та іншими неоднорідностями. Основними напрямками в розробці контактів з тонкою межею поділу є створення несплавних омічних контактів, як наслідок – відмова від використання золота в контакті, нарощування додаткових перехідних напівпровідникових шарів, створення сильнолегованого приповерхневого шару різними методами, спроби зниження температури відпалу.

Ti/Pt металізація [18, 19, 73-75] часто використовується для створення омічного контакту до сильнолегованих шарів фосфіду індію *n*-типу (див. рис. 1). Оптимальними температурами швидкого термічного відпалу таких контактів є 420–450 °С, 30 с [18]. Для уникнення дифузії верхній шар золота наносять після відпалу. Спроби використання такої металізації для *p*-InP дають надто високий контактний опір ( $2,49 \cdot 10^{-3}$  Ом·см<sup>2</sup> при легуванні  $7,5 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>). У роботі [56] розглянуто контакти на основі Ni. Отримано менше значення питомого контактного опору –  $4 \cdot 10^{-5}$  Ом·см<sup>2</sup> при  $N_d = 3 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup> ( $T_{\text{штв}} = 325$  °С, 5 хв), однак міжфазні реакції досить значні. Для того щоб виправити цю ситуацію і обмежити протікання міжфазних реакцій, в роботі [17] запропоновано нанесення готової фази Ni<sub>2</sub>P. Мінімальний контактний опір у такому контакті досягається при відпалі за  $T = 300$  °С і становить  $3 \cdot 10^6$  Ом·см<sup>2</sup> ( $N_d = 2 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>). Деякою проблемою контакту є чутливість адгезії до якості очищення поверхні. Проблеми створення сильнолегованих шарів фосфіду індію іонною імплантацією розглянуто у роботах [64, 67, 105].

У роботі [34] для створення різкої межі поділу і низького контактного опору до *n*- та *p*-InP пропонується створення варізонних структур на основі W-Sb та W-In-Sb відповідно. Контакти мають достатньо прийнятні значення питомого опору, проте, судячи з оже-профілів, межа поділу контакту при оптимальному відпалі сильно розмита.

Як перехідний шар для створення омічного контакту може бути використано епітаксіально нарощений шар In<sub>0,53</sub>Ga<sub>0,47</sub>As [18]. Епітаксіальний шар являє собою матеріал із забороненою зоною нижчою, ніж у напівпровідника (0,75 еВ), що полегшує створення до нього омічних контактів [18, 74, 75, 79]. Епітаксіальне нарощування шару напівпровідника з екстремально низькою шириною забороненої зони InAs запропоновано в [110]. Такі шари мають високу провідність через високу концентрацію власних дефектів і потенційно можуть бути перспективними для створення омічних контактів.

### **МЕХАНІЗМИ СТРУМОПЕРЕНОСЕННЯ В ОМІЧНИХ КОНТАКТАХ ДО *p*- ТА *n*-InP**

Основними механізмами струмоперенесення в омічних контактах до *n*-InP є польова емісія, рідше термопольова та термоелектронна, залежно від рівня легування напівпровідника та матеріалу контакту [32, 99, 102, 107]. Однак, як видно з рис. 1, де кривою позначено мінімально можливий контактний опір, розрахований на основі трьох

вищезгаданих механізмів, не усі контакти описуються таким чином. Можливими причинами такого є значне підлегвання підконтактного об'єму напівпровідника, яке не враховується при розрахунках питомого контактного опору і, як наслідок, приводить до отримання занижених значень питомого контактного опору. Іншими можливими причинами є розвинута поверхня межі поділу контакту, спайки, шунти, утворені осадженням металу на дислокаціях [32, 102] і т. ін. Основним механізмом струмоперенесення в омичних контактах до *p*-InP є термоелектронна емісія крізь низький потенціальний бар'єр [62, 99].

## ВИСНОВКИ

Для отримання термостабільного омичного контакту до фосфіду індію з низьким питомим контактним опором потрібна багат шарова контактна металізація. Як контактоутворюючі матеріали для контактної металізації найчастіше використовують благородні метали, серед них срібло, золото, паладій, платина.

Контакти на основі золотогерманієвої евтектики створюють найменший питомий контактний опір. Для підвищення температурної стабільності золотогерманієвих контактів часто вводять шар металу, котрий при відпалі утворював би стабільні фосфіди з якомога меншою роботою виходу.

Коли потрібна максимально однорідна межа поділу, використовують контакти без участі золота, наприклад на основі Pd, Pt/Ti. Проте їх питомий контактний опір значно вищий. Або використовують метали та сполуки металів, які слабо реагують з фосфідом індію, зокрема W, WSi, Ni<sub>2</sub>P. Іншими методами є вирощування варізонних структур, напівпровідникових шарів з нижчою шириною забороненої зони і/або з екстремально високим ступенем легування.

**Ya.Ya. Kudryk**

## METHODS FOR CREATION AND PROPERTIES OF OHMIC CONTACTS TO INDIUM PHOSPHIDE (REWIEV)

The investigation results of specific resistivity of ohmic contacts to InP have been systematized. The comparison of different formation methods, materials to the ohmic contacts, interfacial interactions during thermal annealing have been considered and the optimal annealing temperature for each type of considered metallization has been obtained. Being based on the performed analysis, recommendations have been given to optimize the ohmic contact layer structures, depending on the area of their application and required parameters.

**Keywords:** ohmic contact, indium phosphide, diffusion barrier, current transport.

1. *Science and Technology of Millimeter Wave Components and Devices* / E. Lyubchenko. – CRC Press. – 2001.
2. *Широкозонные полупроводники для силовой электроники* / А.А. Лебедев, В.Е. Челноков // ФТП. – 1999. – **33**, № 9. – С. 1096-1099.
3. *NISM Archive – Physical Properties of Semiconductors* / [электронный ресурс] доступ к журналу: <http://www.matprop.ru>
4. *Anderson W.T., jr., Christou A. and Davey J.E.* Amorphous thin film diffusion barriers on GaAs and InP // *Thin Solid Films*. – 1983. – **104**. – P. 57-67.
5. *Кудрик Я.Я.* Наноструктурированные антидиффузионные слои в контактах к широкозонным полупроводникам // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. – 2013. – № 6. – С. 3-13.
6. *Avishay Katz*, Physical and Chemical Deposition of Metals as Ohmic Contacts to InP and Related Materials // *Handbook of Compound Semiconductors*. – 1996. – P. 170-250.
7. *Mojzes I., Veresegyhazy R. and Malina V.* Thermal dissociation of InP covered with metallic contact layers // *Thin Solid Films*. – 1986. – **144**. – P. 29-40.

8. *A survey of ohmic contacts to III-V compound semiconductors* / A. Baca, F. Ren, J. Zolper, R. Briggs, S. Pearton // *Thin Solid Films*. – 1997. – **308-309**. – P. 599-606.
9. *Ivey D.G., Jian Ping*. Metallurgy of ohmic contacts to InP // *Canadian Metallurgical Quarterly*. – 1995. – **34**, N2. – P. 85-113.
10. *Au/Ge/Ni Ohmic Contacts to n-type InP* / D.G. Ivey, D. Wang, D. Yang, R. Bruce and G. Knight // *J. Electron. Mater.* – 1994. – **23**, N5. – P. 441-446.
11. *Fatemi N.S., Weizer V.G.* The achievement of low contact resistance to indium phosphide: the roles of Ni, Au, Ge, and combinations thereof // *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* – 1992. – **260**. – P. 537-542.
12. *Новицкий С.В.* Омические контакты к фосфиду индия // *Петербургский журнал электроники*. – 2012. – N1. – P. 24-40.
13. *Pécz B., Veresegyházy R., Radnóczy G. et al.* Cross-sectional transmission electron microscopic study of Au/GaP and Au/InP contacts // *J. Appl. Phys.* – 1991. – **70**. – P. 332-336.
14. *Kuphal E.* Low resistance ohmic contacts to n- and p-InP // *Solid-State Electronics*. – 1981. – **24**. – P. 69-78.
15. *Low resistance ohmic contacts onto n-InP by palladium electroless bath deposition* / G. Stremdoerfer, C. Calais, J.R. Martin et al. // *J. Electrochem. Soc.* – 1990. – **137**, N3. – P. 835-838.
16. *Solid-phase epitaxial Pd/Ge ohmic contacts to In<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>As<sub>y</sub>P<sub>1-y</sub>/InP* / W.X. Chen, S.C. Hsueh, P.K.L. Yu et al. // *IEEE Electron. Device Lett.* – 1986. – **EDL-7**, N 8. – P. 471-473.
17. *Sputtered Ni-P as an ohmic contact to n-InP, p-InGaAs and as a diffusion barrier* / A. Appelbaum, M. Robbins, F. Schrey // *IEEE Trans. Electron Dev.* – 1987. – **ED-34**, N 5. – P. 1026-1031.
18. *Au/Pt/Ti contacts to p-In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As and n-InP layers formed by a single metallization common step and rapid thermal processing* / A. Katz, B.E. Weir, W.C. Dautremont-Smith // *J. Appl. Phys.* – 1990. – **68**, N 3. – P. 1123-1128.
19. *Pt/Ti/n-InP nonalloyed ohmic contacts formed by rapid thermal processing* / A. Katz, B.E. Weir, S.N.G. Chu et al. // *J. Appl. Phys.* – 1990. – **67**, N 8. – P. 3872-3875.
20. *Annealed AuGe based ohmic contacts milling prior to metallization on InP with ion* / J. Dunn, G.B. Stringfellow // *J. Electron. Mater.* – 1990. – **19**, N 2. – P. L1-L3.
21. *Агеев О.А., Беляев А.Е., Болтовец Н.С., Конакова Р.В. и др.* Фазы внедрения в технологии полупроводниковых приборов. – X. : НТК «Институт монокристаллов». – 2008.
22. *The role of Ru in improving Schottky and ohmic contacts to InP* / W.O. Barnard, G. Myburg, F.D. Auret et al. // *J. Vac. Sci. Technol. A*. – 1995. – **46**, N 8-10. – P. 893-897.
23. *Sputtered full-wafer backside metallization for n-type InP: Effect of temperature annealing* / St. J. Dixon-Warren, S. Zhang, R. Kuchibhatla et al. // *Thin Solid Films*. – 2005. – **472**. – P. 76-83.
24. *Formation mechanism of low contact resistance PdZn-based ohmic contacts for p-type InP* / Hirokuni Asamizu, Akira Yamaguchi, Yasuhiro Iguchi, Tadashi Saitoh, Masanori Murakami // *Mater. Trans.* – 2002. – **43**, N 6. – P. 1352-1359.
25. *Kim Tae-Jie, Holloway Paul H.* Ohmic Contacts to II-VI and III-V Compound Semiconductors, in: *Wide Bandgap Semiconductors: Growth, Processing and Applications* / Eds. Stephen J. Pearton. – Park Ridge, N.J.: Noyes Publications, Norwich N.Y.: William Andrew Pub. – 2000.
26. *Keramidas V.G.* Metallurgical interactions at metallization-compound semiconductor interfaces // *Thin Solid Films*. – 1982. – **96**, N 4. – P. 347-363.
27. *Boos J.B., Kruppa W.* Low-resistance AuZn gate ohmic contacts for InP JFETs // *Solid-State Electron.* – 1988. – **31**, N 2. – P. 127-133.
28. *Low resistance ohmic contact scheme ( $\mu\Omega\text{-cm}^2$ ) to p-InP* / M.H. Park, L.C. Wang, J.Y. Cheng et al. // *Appl. Phys. Lett.* – 1997. – **70**, N 1. – P. 99-101.
29. *Zhang K., Tang H., Wu X., Xu J., Li X.* A Improved Au/Zn/Au Ohmic Contacts for p-Type InP International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2007: Photoelectronic Imaging and Detection // *Proc. SPIE*. – 2008. – **6621**. – P. 662118-1.
30. *Ivey D.G.* Platinum metals in ohmic contacts to III-V semiconductors // *Platinum Met. Rev.* – 1999. – **43**, N 1. – P. 2-12.
31. *Ohmic contact formation in palladium-based metallizations to n-type InP* / P. Jian, D.G. Ivey, R. Bruce et al. // *J. Electron. Mater.* – 1994. – **23**, N 9. – P. 953-962.
32. *Бланк Т.В., Гольдберг Ю.А.* Механизмы протекания тока в омических контактах металл-полупроводник. Обзор // *ФТП*. – 2007. – **41**, №11. – С. 1281-1308.
33. *Huang W.C.* Effect of Au overlayer on PtSi ohmic contacts with n-InP // *Appl. Surf. Sci.* – 2005. – **245**. – P. 141-148.
34. *Graded band-gap ohmic contacts to n- and p-type InP* / R. Dutta, M.A. Shahid, P.J. Sakach // *J. Appl. Phys.* – 1991. – **69**, N. 7. – P. 3968-3974.
35. *AuGePt ohmic contact to n-type InP* / W.C. Huang, T.F. Lei, C.L. Lee // *J. Appl. Phys.* – 1996. – **79**, N 12. – P. 9200-9205.

36. *PtGe* ohmic contact to n-type InP / W.C. Huang, T.F. Lei, C.L. Lee // *J. Appl. Phys.* – 1995. – **78**, N 10. – P. 6108-6112.
37. *Gold-based* ohmic contacts on III-V compounds: Thermally induced reactions between metallization and the semiconductor compound / A. Piotrowska, E. Kaminska, A. Barcz et al. // *Thin Solid Films.* – 1985. – **130**, N 3-4. – P. 231-236.
38. *Low resistance silver* contacts to indium phosphide: Electrical and metallurgical considerations / V.G. Weizer, N.S. Fatemi // *J. Appl. Phys.* – 1993. – **73**, N 5. – P. 2353-2359.
39. *Conditions* of fabrication that control the interfacial microstructure of metal-semiconductor contacts formed from silver metal and (100)-oriented substrates of indium phosphide / J.S.K. Mills, D.L. Kirk // *Thin Solid Films.* – 1978. – **55**. – P. 149-167.
40. *The use* of mixed alloy contacts to engineer the interfaces and electrical characteristics of metal-InP contacts / A. Saidane, D.L. Kirk // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 1985. – **18**, N 8. – P. 1609-1625.
41. *Characterization* of Zn/Au back contact to low-doped p-InP / O. Oparaku, C.L. Dargan, N.M. Pearsall et al. // *Semicond. Sci. Technol.* – 1990. – **5**, N 1. – P. 65-68.
42. *Ohmic* contacts to p-type InP using BeAu metallization / H. Temkin, R.J. McCoy, V.G. Keramidias et al. // *Appl. Phys. Lett.* – 1980. – **36**, N 6. – P. 444-446.
43. *Au-Be/Au* and *Au-Be/Cr/Au* ohmic contacts to p-type InP and InGaAsP / V. Malina, K. Vogel, J. Zelinka // *Semicond. Sci. Technol.* – 1988. – **3**, N 10. – P. 1015-1021.
44. *Formation*, microstructure and resistances of the contacts Au-Ge/n-GaAs, Au-Ge/n-InP, Au-Zn/p-InP and Au-Be/p-InP / P. Auvray, A. Guivarc'h, H. L'Haridon, J.P. Mercier // *Thin Solid Films.* – 1985. – **127**, N 1-2. – P. 39-68.
45. *Metallurgical* behavior of gold-based ohmic contacts to the InP/InGaAsP material system / I. Camlibel, A.K. Chin, F. Ermanis et al. // *J. Electrochem. Soc.* – 1982. – **129**, N 11. – P. 2585-2590.
46. *Alloyed tin-gold* ohmic contacts to n-type indium phosphide / P.A. Barnes, R.S. Williams // *Solid-State Electron.* – 1981. – **24**, N 10. – P. 907-913.
47. *AuGe/Au* ohmic contacts to n-type InP by hot-plate alloying / S.C. Binari, J.B. Boos // *Electron. Lett.* – 1989. – **25**, N 18. – P. 1207-1209.
48. *An investigation* of Au/Mn contacts to p-type InP / D.G. Ivey, P. Jian, R. Bruce // *Thin Solid Films.* – 1990. – **190**, N 2. – P. 217-226.
49. *Ohmic* contacts to III-V compound semiconductors: a review of fabrication techniques / A. Piotrowska, A. Guivarc'h, G. Pelous // *Solid-State Electron.* – 1983. – **26**, N 3. – P. 179-197.
50. *The relationship* between the microwave efficiency of indium phosphide transferred electron devices and the metallurgical state of the cathode contact / D.L. Kirk, J.S.K. Mills, J.E. Pattison // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 1979. – **12**, N 11. – P. 1995-2001.
51. *Near-noble* transition-metal-based ohmic contacts to p-InP: Comparison of Ni and Pd as a base metal / A. Yamaguchi, H. Asamizu, T. Okada et al. // *J. Appl. Phys.* – 1999. – **85**, N 11. – P. 7792-7796.
52. *Ohmic* contacts of Pd/Zn/M(= Pd or Pt)/Au to p-type InP / S. Hwang, J. Shim, Y. Eo // *J. Korean. Phys. Soc.* – 2005. – **46**, N 4. – P. 751-755.
53. *Pd/Zn/Pd/Au* ohmic contacts to p-type InP / D.G. Ivey, P. Jian, L. Wan et al. // *J. Electron. Mater.* – 1991. – **20**, N 3. – P. 237-246.
54. *Phase formation* in Ni/InP contacts / S.E. Mohny, Y.A. Chang // *J. Appl. Phys.* – 1995. – **78**, N 2. – P. 1342-1347.
55. *Transmission/scanning* transmission electron microscopy investigation of Au/Cr contacts to p-type InP / D.G. Ivey, R. Bruce and G.R. Piercy // *Solid-State Electron.* – 1988. – **31**, N 8. – P. 1251-1258.
56. *Characterization* of ohmic contacts to InP / P. Erickson, A. Wascom, G. Y. Robinson // *Thin Solid Films.* – 1979. – **64**. – P. 421-426.
57. *Rapid thermal alloyed* ohmic contact on InP / G. Bahir, J.L. Merz, J.R. Abelson et al. // *J. Electron. Mater.* – 1987. – **16**, N 4. – P. 257-262.
58. *Electrical* and structural investigations of Ag-based ohmic contacts for InAlAs/InGaAs/InP high electron mobility transistors / W. Zhao, L. Wang, I. Adesida // *Appl. Phys. Lett.* – 2006. – **89**. – P. 072105-1-072105-3.
59. *Anomalous lateral Zn* surface diffusion in InP caused by Zn-contained metallization / M.-H. Park, P.H. Hao, L.C. Wang // *J. Electron. Mater.* – 1997. – **26**, N 1. – P. 25-29.
60. *Ohmic* contacts formation on n-InP / J. Morais, T.A. Fazan, R. Landers et al. // *J. Appl. Phys.* – 1996. – **79**, N 9. – P. 7058-7061.
61. *Clausen T., Leistiko O.* Metallurgical optimization for ohmic contacts to InP using conventional metallization schemes // *Microelectron. Eng.* – 1992. – **18**. – P. 305-325.
62. *Clausen T., Leistiko O.* Transport mechanisms in low-resistance ohmic contacts to p-InP formed by rapid thermal annealing // *Appl. Phys. Lett.* – 1993. – **62**, N 10. – P. 1108-1109.
63. *Ni-InP* reaction: formation of amorphous and crystalline ternary phases / T. Sands, C.C. Chang, A.S. Kaplan et al. // *Appl. Phys. Lett.* – 1987. – **50**, N 19. – P. 1346-1348.

64. *Topham P.J.* Ohmic contacts to n-type indium phosphide // Ph.D. Thesis University of Surrey, 1983.
65. *Fatemi N.S., Weizer V.G.* The structural and electrical properties of low resistance Ni contacts to InP // *J. Appl. Phys.* – 1993. – **73**, N 1. – P. 289-295.
66. *AuGeNi* ohmic contacts to n-InP for FET applications / J.A. Del Alamo, T. Mizutani // *Solid-State Electron.* – 1988. – **31**, N 11. – P. 1635-1639.
67. *An optimal annealing technique for ohmic contacts to ion-implanted n-layers in semi-insulating indium phosphide* / K.P. Pande, E. Martin, D. Gutierrez et al. // *Solid-State Electron.* – 1987. – **30**, N 3. – P. 253-258.
68. *The influence of interfacial morphology and composition on the behavior of AuGeNi contacts to InP* / D.A. Anderson, R.J. Graham, J.W. Steeds // *Semicond. Sci. Technol.* – 1988. – **3**, N 2. – P. 63-76.
69. *US Patent N5,015,603.* TiW diffusion barrier for AuZn ohmic contact to p-type InP / J.B. Boos, N.A. Papanicolau, T.H. Weng. May 14, 1991.
70. *Schottky barriers and ohmic contacts on n-type InP based compound semiconductors for microwave FET's* / H. Morkoc, T.J. Drummond, C.M. Stanchak // *IEEE Trans. Electron. Dev.* – 1981. – **ED-28**, N 1. – P. 1-5.
71. *Akira Yamaguchi.* Material characterization of semiconductor devices // *SEI Technical Review.* – 2010. – **70**. – P. 17-27.
72. *Mohney S.E., Chang Y.A.* Interfacial reactions in Pt/InP contacts // *J. Appl. Phys.* – 1993. – **74**, N 7. – P. 4403-4408.
73. *Rapid isothermal processing of Pt/Ti contacts to p-type III-V binary and related ternary materials* / A. Katz, S.N.G. Chu, B.E. Weir et al. // *IEEE Trans. Electron. Dev.* – 1992. – **39**, N 1. – P. 184-191.
74. *Pt/Ti/p-In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As* low resistance nonalloyed ohmic contact formed by rapid thermal processing / A. Katz, W.C. Dautremont-Smith, S.N.G. Chu et al. // *Appl. Phys. Lett.* – 1989. – **54**, N 23. – P. 2306-2308.
75. *Interfacial microstructure and electrical properties of the Pt/Ti ohmic contact in p-In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As* formed by rapid thermal processing / S. N. G. Chu, A. Katz, T. Boone et al. // *J. Appl. Phys.* – 1990. – **67**, N 8. – P. 3754-3760.
76. *Pt/Ti ohmic contact to p<sup>++</sup>-InGaAsP (1.3 μm)* formed by rapid thermal processing / A. Katz, P.M. Thomas, S. N. G. Chu et al. // *J. Appl. Phys.* – 1990. – **67**, N 2. – P. 884-889.
77. *Pt/Ti/p-InGaAsP* nonalloyed ohmic contact formed by rapid thermal processing / A. Katz, W.C. Dautremont-Smith, P.M. Thomas et al. // *J. Appl. Phys.* – 1989. – **65**, N 11. – P. 4319-4323.
78. *Interfacial microstructure and carrier conduction process in Pt/Ti ohmic contact to p-In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As* formed by rapid thermal processing / S.N.G. Chu, A. Katz, T. Boone et al. // *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* – 1990. – **181**. – P. 389-399.
79. *Межфазные взаимодействия и особенности структурной релаксации в контактах TiB<sub>x</sub>-n-GaAs (InP, GaP, 6H-SiC), подвергнутых активным обработкам* / Н.С. Болтовец, В.Н. Иванов, Р.В. Конакова и др. // *ФТП.* – 2004. – **38**, № 7. – С. 769-774.
80. *Perkins J.H., O'Keefe M.F., Miles R.E., Snowden C.M.* Pt and Zn based ohmic contacts to p-type InP // *Indium Phosphide and Related Materials, IEEE Conf. Proc., Mar. 27-31, 1994, Santa Barbara, CA, P. 190-193.*
81. *Hasenberg T.C., Garmire E.* An improved Au/Be contact to p-type InP // *J. Appl. Phys.* – 1987. – **61**, N 2. – P. 808-809.
82. *Planar fully ion-implanted InP junction FET's with a nitride-registered gate metallization* / J.B. Boos, W. Kruppa, B. Molnar // *IEEE Trans. Electron. Dev.* – 1989. – **10**, N 2. – P. 79-81.
83. *A low-resistance spiking-free n-type ohmic contact for InP membrane devices* / Y. Jiao, T. de Vries, R.-S. Unger et al. // *Indium Phosphide and Related Materials (IPRM), 26th Intern. Conf. May 11-15, 2014.*
84. *Very low resistance Ni-based alloyed ohmic contacts to InP-capped and uncapped n<sup>+</sup>-InGaAs* / M. Abraham, Won Hyuck Choi, Shih-Ying Yu et al. // *J. Appl. Phys.* – 2014. – **116**, Issue 16. – P. 164506-1.
85. *Laser Technology to Contacts Formation of III-V Semiconductors for Measuring Use* / L. Hudec, P. Machác, V. Myslík, and M. Vrnata // *Laser Physics.* – 1998. – **8**, N 1. – P. 340-343.
86. *Влияние микроволнового облучения на сопротивление омических контактов Au-TiB<sub>x</sub>-Ge-Au-n-n<sup>+</sup>-n<sup>++</sup>-GaAs(InP)* / А.Е. Беляев, А.В. Саченко, Н.С. Болтовец и др. // *ФТП.* – 2012. – **46**, выпуск 4. – С. 558-561.
87. *Optimization of ohmic contact for InP-based transferred electronic devices* / Wu Deqi, Ding Wuchang, Yang Shanshan et al. // *J. Semicond.* – 2014. – **35**, N 3. – P. 036001.
88. *Mills H.T. and Hartnagel H.L.* Ohmic contacts to InP // *Intern. J. Electron.* – 1979. – **46**, N 1. – P. 65-73.
89. *Mills H.T. and Hartnagel H.L.* Ideal ohmic contacts to InP // *Electron. Lett.* – 1975. – **11**, Issues 25-26. – P. 621-622.
90. *O'Keefe M.F., Miles R.E., Howes M.J.* Nickel In Ohmic Contacts To Indium Phosphide // *SPIE 1144, 1st Intern. Conf on Indium Phosphide and Related Materials for Advanced Electronic and Optical Devices, 361 (November 28, 1989); doi:10.1117/12.962022.*
91. *Weimann G. and Schlapp W.* Ohmic contacts on indium phosphide // *phys. status solidi (a).* – 1978. – **50**. – P. K219.
92. *Influence of cap-layer doping on ohmic contacts for InP based HEMT structures* / B.-U.H. Klepser, C. Bergamaschi and W. Patrick // *Solid-State Electron.* – 1994. – **37**, N 12. – P. 1905-1906.

93. *Новицкий С.В.* Исследование температурной зависимости контактного сопротивления омических контактов к InP // ТКЭА. – 2012. – №4. – С. 32-34.
94. *Belyaev A.E., Boltovets N.S., Ivanov V.N. et al.* Heat-resistant barrier and ohmic contacts based on  $TiB_x$  and  $ZrB_x$  interstitial phases to microwave diode structures // *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*. – 2008. – **11**, N3. – P. 209-216.
95. *Влияние* термо- и микроволновой обработок на свойства омических контактов к  $n-p^+-p^{++}$ -InP(GaAs, GaN) / А.Е. Беляев, Н.С. Болтовец, В.Н. Иванов и др. // *Известия вузов. Физика*. – 2011. – **1-2**. – С. 74-77.
96. *Радиационные* эффекты в омических и барьерных контактах к фосфиду индия, содержащих поликристаллические и аморфные диффузионные барьеры / А.Е. Беляев, Н.С. Болтовец, А.В. Бобыль и др. // Труды XX Международного совещания «Радиационная физика твердого тела», Севастополь, 5 июля – 10 июля 2010 г., С. 222-231.
97. *Радиационные* эффекты и межфазные взаимодействия в омических и барьерных контактах к фосфиду индия, стимулированные быстрыми термическими обработками и облучением  $\gamma$ -квантами  $^{60}Co$  / А.Е. Беляев, Н.С. Болтовец, А.В. Бобыль и др. // *Физика и техника полупроводников*. – 2010. – **44**, N12. – С. 1607-1614.
98. *Патент 83664 Україна*, МПК H01L 21/268. Спосіб створення омичного контакту до InP та GaAs. ІФН ім. В.Є. Лашкарьова НАНУ. Заявл. 2013. № заяв. u2013 03026.
99. Transport properties of low-resistance ohmic contacts to InP / T. Clausen, O. Leistiko, I. Chorkendorff and J. Larsen // *Thin Solid Films*. – 1993. – **232**. – P. 215-227.
100. *Structural* and electrical characterizations of Ag-InP(100) interfaces stabilized by antimony / F. Miloua, C. Jardin, M. Bouslama, B. Khelifa and B. Gruzza // *Mater. Chem. and Phys.* – 1993. – **33**. – P. 85-88.
101. *Valois A.J. and Robinson G.Y.* Au/Be ohmic contacts to p-type indium phosphide // *Solid-State Electron*. – 1982. – **25**, N10. – P. 973-977.
102. *The features* of contact resistivity behavior at helium temperatures for InP- and GaAs-based ohmic contacts / A.V. Sachenko, A.E. Belyaev, N.S. Boltovets, S.A. Vitusevich, R.V. Konakova, S.V. Novitskii, V.N. Sheremet. *Електронний ресурс*. Режим доступу: [<http://arxiv.org/abs/1401.1658>]
103. *Wen Chang Huang, Chia Tsung Horng, Shr Shin Tsai.* PdSi based ohmic contact on n-InP // *Appl. Surf. Sci.* – 2009. – **255**. – P. 8464-8469.
104. *Contact* metallurgy optimization for ohmic contacts to InP / T. Clausen, A.S. Pedersen and O. Leistiko // *Microelectron. Eng.* – 1991. – **15**. – P. 157-160.
105. *Yamaguchi E., Nishioka T. and Ohmachi Y.* Ohmic contacts to Si-implanted InP // *Solid-State Electron*. – 1981. – **24**, N 3. – P. 263-265.
106. *Au/Pd/Te* ohmic contacts on n-type InP / P.A. Leigh, R.M. Cox and P.J. Dobson // *Solid-State Electron*. – 1994. – **37**, N 7. – P. 1353-1358.
107. *Alternative* ohmic contact systems to n-InP / W.O. Barnard, G. Myburg, F.D. Auret, J.B. Malherbe, C.W. Louw // *Appl. Surf. Sci.* – 1993. – **70/71**. – P. 515-519.
108. *Minimal* ohmic contact resistance limits to n-type semiconductors / R.K. Kupka, W.A. Anderson // *J. Appl. Phys.* – 1991. – **69**, N6. – P. 3623-3632.
109. *Tung R.T.* Recent advances in Schottky barrier concepts // *Mater. Sci. and Eng.: Reports*. – 2001. – **35**, N 1. – P. 1-138.
110. *Growth* of InN for ohmic contact formation by electron cyclotron resonance metalorganic molecular beam epitaxy / C.R. Abernathy, S.J. Pearton, F. Ren, and P.W. Wisk // *J. Vacuum Sci. & Technol. B*. – 1993. – **11**. – P. 179-182.
111. *Clawson A.R.* Guide to references on III-V semiconductor chemical etching // *Mater. Sci. and Eng.: Reports*. – 2001. – **31**, N 1. – P. 1-438.

Інститут фізики напівпровідників  
ім. В.Є. Лашкарьова НАН України,  
проспект Науки, 41,  
03680 Київ, Україна  
e-mail: kudryk@isp.kiev.ua

Отримано 16.05.2015