

нанесення, отримати комплекс термомеханічних властивостей для розрахунку їх несучої здатності та ресурсу [3]. В результаті оптимізації порівняно з базовим варіантом довговічність багатощарових теплозахисних покриттів підвищено на 40%, швидкість повзучості знижено на 35% та підвищено товщину зовнішнього керамічного шару у 1,5 рази. Це скорочує обсяги стендових та натурних випробувань та забезпечує лабораторну експериментально-розрахункову базу для вдосконалення випробувань теплозахисних покриттів.

Список посилань

1. Ляшенко Б.А. О критериях адгезионно-когезионной равнопрочности и термостойкости защитных покрытий. *Проблемы прочности*. № 10. 114. (1980).
2. Ляшенко Б.А., Сорока Е.Б., Акинин К.Г. О связи адгезионной прочности и температурных перепадов в теплозащитных покрытиях. *Проблемы прочности*. №4. 126-130. (1998).
3. Ляшенко Б.А., Шаривкер С.Ю., Цыгулев О.В. и др. Методика определения механических характеристик композиции металл-защитное покрытие. *Проблемы прочности*. № 8. 113-115. (1989).

УДК 621.382.2

Фролов О.М., канд. техн. наук, доцент

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв,
iskanderfrolov52@gmail.com

Селіверстова С.Р., канд. техн. наук

Селіверстов І.А., канд. техн. наук

Херсонська державна морська академія, ussr28031972@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ДОМІШОК У ДРЕЙФОВИХ N-P-N ТРАНЗИСТОРАХ

Особливе місце серед дискретних приладів займають транзистори, які в апаратурі дозволяють не тільки збільшувати сигнали, але і здійснювати плавне і точне регулювання електричних сигналів. Параметри та характеристики дрейфових транзисторів безпосередньо пов'язані з розподілом домішки у базових областях транзисторів.

Розроблені методики розрахунку реального розподілу домішки бору в базі вимагають даних про дозу домішки бору, про температуру та час процесу розгонки домішки, про товщину оксиду над базовою областю, про середовище, в якому проводиться розгін домішки [1]. Однак, при попередньому розрахунку параметрів розподілу домішки за заданими параметрами та характеристиками транзистора, що проводиться за методикою, наведеною в [2], ці дані відсутні. Більшість цих даних визначається за даними розрахунку розподілу домішки в базі. Реальний розподіл домішки бору в базових областях n-p-n транзисторів відрізняється від теоретичного за рахунок прояву ефекту перерозподілу домішки на межі розділу Si-SiO₂ і через вплив коефіцієнта сегрегації [3]. Ці ефекти призводять до того, що частина домішки бору, якою формують базову область при термічному окисненні, йде в шар окислу кремнію, що росте. Внаслідок цього реальна поверхнева концентрація бору стає меншою, ніж за теоретичним розрахунком.

Для визначення залежностей параметрів та характеристик дрейфового біполярного n-p-n транзистора від розподілу домішки в базі проведено експериментальні дослідження за різних технологічних режимів створення транзисторів.

Були використані кремнієві пластини з різними питомими опорами (ρ_{ep}) епітаксійних шарів. Формування базових областей проводилося після фотолітографії під базові області різними дозами бору (Q_b) за допомогою іонного легування на установках іонного легування типу «Везувій -3М» з подальшим перерозподілом домішки (розгін домішки) за різних високих температур (T_p) та різних часів (t_p). Дифузія фосфору на формування

емітерів проводилася після фотолітографії під емітери шляхом одностадійної дифузії фосфору при температурі 1040°C. Після дифузії фосфору проводилася фотолітографія для розтинку вікон до дифузійних областей. Параметри транзисторів визначалися на тестових транзисторах вимірювачі параметрів напівпровідникових приладів типу Л2-56. Глибина емітерного та колекторного р-п переходів визначалася методом «шар-шліфа» на тестових реперах, створених у кожній пластині. Після отримання мінімальних коефіцієнтів посилення проводився дорозгін фосфору при температурі 900°C. Як показали результати вимірювання глибини р-п переходів, при дорозгоні фосфору змінювалися глибина емітерного р-п переходу і коефіцієнт посилення транзистора, проте через малу температуру процесу глибина колекторного р-п переходу практично не змінилася. Результати досліджень наведено в таблиці 1.

Як показали результати вимірювання глибини р-п переходів, при дорозгоні фосфору змінювалися глибина емітерного р-п переходу і коефіцієнт посилення транзистора, проте через малу температуру процесу глибина колекторного р-п переходу практично не змінилася.

Таблиця 1 – Результати досліджень отриманих n-p-n переходів при різних технологічних режимах

№	Параметри технологічних режимів				Данні вимірів					
	$\rho_{\text{еп}}$, Ом·см	$Q_{\text{б}}$, мкКл/см ²	T_p , °C	t_p , хв.	Глибина р-п переходів, мкм		Електричні параметри			
					$x_{jэ}$	x_{jk}	$h_{21э}$, од.	$U_{кбо}$, В	$U_{кэо}$, В	$U_{эбо}$, В
1.1	2,5	4,0	1180	200	1,51	3,60	243	149	37,0	23,0
1.2					1,91		357		34,2	23,0
1.3					2,24		720		28,7	23,1
2.1.	1,2	15	1150	110	1,39	2,62	140	68	19,7	11,5
2.2					1,62		235		17,3	11,6
2.3					1,84		330		15,9	11,5
3.1	1,2	50	1150	85	1,21	2,51	95	62,8	20,1	8,3
3.2					1,46		137		18,3	8,2
3.3					1,61		220		16,2	8,2
4.1	0,3	15	1150	80	1,17	1,87	147	28,1	8,1	10,9
4.2					1,29		295		6,8	11,1
4.3					1,42		465		6,1	11,0

Данні вимірювання електричних параметрів транзисторів, отриманих при дослідженнях, показують, що:

- коефіцієнти посилення по струму в схемі із загальним емітером ($h_{21э}$) і напруга пробою ($U_{кэо}$), залежать від товщини бази і напруги ($U_{кбо}$), що повністю узгоджується з теорією і підпорядковується відомим розрахунковим формулам.

- напруга пробою ($U_{кбо}$) залежить від глибини колекторного р-п переходу, від питомого опору епітаксійного шару та від дози домішки, що також узгоджується з теорією та підпорядковується відомим розрахунковим формулам.

- напруга пробою ($U_{эбо}$) не залежить від глибини емітерного р-п переходу, але залежить від дози домішки, від температури і часу розгонки базової домішки, тобто від добутку (Dt).

На базі результатів досліджень була створена модель спрощеного розрахунку структури дрейфового n-p-n транзистора. При якій визначено, що найбільш оптимальне поєднання електричних параметрів і характеристик у дрейфових n-p-n транзисторів, у яких глибина

емітерного p-n переходу буде збігатися з глибиною максимальної концентрації базової домішки.

Список посилань

1. Kato T., Nishi Y. Redistribution of diffused boron in silicon by thermal oxidation. [Text] / Japan. J. Appl. Phys. – 1067, v.3. – № 7. – P. 377-383.
2. Баганов Е.А. Расчет параметров дрейфовых n-p-n транзисторов по выходным характеристикам [Текст] / Баганов Е.А., Фролов А.Н., Фролов К.А. // Известия вузов, Радиоэлектроника. – № 9-10. – 2009. – С.10-17.
3. Самойлов Н.А. Методика оперативной оценки пробивного напряжения p-p-n транзисторов [Текст] / Н.А. Самойлов, А.Н. Фролов, С.В. Шутов. / Петербургский журнал электроники. – 1996. – №4. – с.42-45.

УДК 621.762

Лебедєва Н. Ю., канд. техн. наук, доцент
Дрозд О. В., канд. техн. наук, доцент
Гашицька О. М., студентка
Буренко Г. М., студент

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв,
oksanadroz183@gmail.com

ФОРМУВАННЯ МІДНИХ ПОРИСТИХ МАТЕРІАЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ВИРОБНИЧИХ ВІДХОДІВ

Створення нових мідних пористих матеріалів обумовлено перспективністю їх застосування для виготовлення фільтрів та антифрикційних виробів. Для їх виготовлення використовуються порошки міді, зокрема марки ПСМ-1 (ДСТУ 4960:2019, IDT) дисперсністю до 100 мкм. Це дороговартісна дефіцитна сировина з високою хімічною чистотою, подальше застосування якої у технологіях порошкової металургії не є доцільним і рентабельним. Вирішення проблем заміни мідного порошку полягатиме у теоретично-практичній проробці питань застосування в технологіях одержання пористих матеріалів порошків, одержаних здрібненням виробничих відходів міді.

Мета роботи – експериментальне дослідження можливостей формування мідних пористих матеріалів з використанням виробничих відходів.

Науково-методичне підґрунтя дослідження складають фізико-механічні основи та існуючий практичний досвід з формування мідних порошкових матеріалів і виробів [1, 2]; основи теорії мідних сплавів [3] та досвід авторів роботи [4], присвяченої розвитку рециклінгу виробничих відходів як перспективного напрямку матеріалознавства. Для досягання поставленої мети в роботі застосовані методи оптичної металографії (оптичний мікроскопи ММР-2Р, БИОЛАМ-И), механічних випробувань, холодного статичного пресування з використанням зразків лабораторного обладнання.

Експериментальні роботи полягали у одержанні порошку міді (рис. 1, а) шляхом механічного здрібнення виробничих відходів міді (тирсів, бракованих виробів тощо) та одержанні з них пресовок (рис. 1, б) методом холодного двобічного статичного пресування.

Досліджено морфологічні характеристики порошку (дисперсність, фактор форми, периметр), визначено його мікротвердість (прилад ПМТ-3, навантаження на індентор 50 мг). Процес пресування здійснено у холодному стані (тиск 20 МПа) без пластифікатора, для чого застосовано прес-форму із нержавіючої сталі марки 10Х18Н9Т. За допомогою оптичної металографії досліджено пористість пресовки, ступінь деформації порошку міді; визначено його мікротвердість після пресування (прилад ПМТ-3, навантаження на індентор 50 мг). Для спікання одержаної заготовки застосовано герметично зачинений контейнер з термічно необробленого графіту марки МПГ-6. Пресовка разом з контейнером зазнавала