

УДК 621.382

Кривоус А.С.¹, Сніжної Г.В.², Солодовник А.І.³

¹ асп. НУ «Запорізька політехніка»

² д-р. техн. наук, проф. НУ «Запорізька політехніка»

³ директор ТОВ «Елемент-Перетворювач»

АНАЛІЗ ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОБЛЕМ, ПОВ'ЯЗАНИХ З ВИМОГАМИ ДО МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ СИЛОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

Основою енергоефективної економіки є високотехнологічна силова електроніка. Використання якісних та надійних силових напівпровідникових приладів (СНП) та силових напівпровідникових модулів (СНМ) сприяє заощадженню електроенергії в транспорті та промисловості. Якість СНП та СНМ залежить здебільшого від використання якісних матеріалів при виготовленні цих виробів. До основних матеріалів, що використовуються для виготовлення СНП та СНМ, відносяться монокристалічний кремній, мідь, молібден, матеріали для пасивації краєвого профілю напівпровідникової структури та металізовані керамічні підкладки.

Для виготовлення напівпровідникових структур використовується монокристалічний кремній різних діаметрів, який отримується методами Чохральського, безтигельної зонної плавки (БЗП) та БЗП з нейтронним легуванням кремнію. Кремній отриманий методом Чохральського значно дешевше кремнію отриманого БЗП та нейтронно-легованого кремнію, але він має суттєві недоліки – великий розмах значень та нестабільність питомого опору, обмеження по максимальному значенню питомого опору (не вище 100 Ом·см), великий вміст кисню та вуглецю. Через це, кремній отриманий методом Чохральського, використовують лише в приладах напругою до 1200 В та на струми до 100-200 А. Для приладів на більші напругу та струм використовують кремній отриманий методом БЗП. Він має відносно високу термостабільність та малий розмах значень питомого опору ($\leq 5-7\%$). До недоліків можна віднести велику вартість.

Через велику різницю коефіцієнта теплового розширення кремнію та міді складно паяти напівпровідникову структуру одразу до мідного електроду. В якості термокомпенсаторів в СНП та СНМ використовують диски та пластини з молібдену. В термокомпенсаторах, які виготовляються з листового прокату, часто спостерігаються розшарування по краю диску. Це призводить до потрапляння хімічних реактивів до ущелин з ускладненням видалення їх під час технологічних процесів та збільшенню теплового опору СНП. У випадку виготовлення молібденових термокомпенсаторів способом порошкової металургії виникають проблеми виготовлення дисків малої товщини, пористості та міцності при механічній обробці.

Для виготовлення електродів для подання струму в СНП та СНМ використовують мідь. Для з'єднання електродів з керамічним корпусом, або з напівпровідниковою структурою, переважно використовується пайка в середовищі з високою концентрацією водню при високій температурі. Для запобігання утворенню «водневої крихкості» в струмопровідних електродах повинна використовуватись мідь з низьким вмістом кисню (<0,001%). Така мідь після процесу пайки залишається м'якою та не викликає великого механічного напруження в кремнії, що в багатьох випадках є корисними властивостями такої міді. Але у випадку, коли в СНП використовуються притискні контакти з зусиллям стиску >250 кг/см² або різьбові з'єднання з охолоджувачем, мідь починає «текти», через що параметри приладів можуть погіршуватися. Зокрема, відбувається послаблення зусилля стиску в притискних контактах та ін. Тому в мідь необхідно вносити зміцнюючі домішки, але ці домішки не повинні суттєво погіршувати електро- та теплопровідність міді.

Для утворення гальванічної розв'язки струмопровідних електродів в СНМ використовують діелектричні керамічні підкладки на основі Al₂O₃ та AlN з тонким (до 10-20 мкм) або з товстим (до 300 мкм) шаром міді. Існують проблеми недостатньої міцності адгезії металізації до керамічної поверхні, особливо до кераміки з AlN. Підкладки з AlN хоч і суттєво дорожче за підкладки з Al₂O₃, але мають теплопровідність у 8 разів більшу в порівнянні з Al₂O₃, а це дуже важливо при використанні в СНМ на великий струм. Останнім часом, в силовій електроніці поширення набули DBC (Direct Bonded Copper) підкладки з мідною фольгою на кераміці, але це накладає низку вимог до технологічних процесів під час виробництва силових напівпровідникових модулів: температура пайки обмежена 400°C в середовищі водню. Крім того, товщина кераміки з DBC повинна бути до 0,5 мкм при товщині міді 0,3 мкм, а це зменшує електроміцність СНМ.

Для пасивації краю профілю фаски напівпровідникових структур використовують кремнійорганічні компаунди та багатокомпонентне скло. Головні проблеми цієї технологічної операції – це чистота захисних матеріалів, стабільність їх захисних властивостей, збереження заряду заданої величини на поверхні кремнію, який вони утворили, а також міцність адгезії захисного матеріалу до кремнію. Оскільки під час тривалої експлуатації СНП та СНМ піддаються циклічним тепловим навантаженням, які можуть погіршувати ВАХ приладів, необхідно забезпечувати високу міцність адгезії та стабільність захисного покриття на кремнії.

Наведені вище проблеми не можливо вирішити на виробництвах без залучення науковців за різним фахом освіти, підготовкою яких займається НУ «Запорізька політехніка».