

Е. В. ГАЛБА, аспірант  
В. М. СЛИДЕНКО, к.т.н., доцент  
Л. К. ЛИСТОВЩИК, к.т.н., доцент

**Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»  
КОМПЛЕКС ИМПЛОЗИОННО-ВОЛНОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ  
ПРОДУКТИВНОСТИ ДОБЫЧИ УГЛЕВОДОРОДОВ**

*Представлен комплекс имплозионно-волнового воздействия для увеличения продуктивности добычи углеводородов, который синтезирован на основе применения процесса имплозии. Комплекс генерирует направленные дискообразные волны с одновременной откачкой флюида из скважины. Фактически речь идет об синергическом воздействии на породу коллектор. Подобное воздействие позволяет увеличить проницаемость коллектора, и реанимировать скважину в целом.*

*Целью работы является обоснование параметров элементов комплекса имплозионно-волнового воздействия на коллектор пластовой системы нефтяной скважины для образования в ней системы микротрещин, увеличение гидропроницаемости и очистки зоны фильтрации коллектора нефтяной скважины от кольматанта .*

*На основе представленных расчетных схем комплекса выполнены расчеты и обосновано его рациональные параметры.*

*В результате получены зависимости коэффициента инжекции от изменения геометрических параметров струйного аппарата. Определены значения повышения давления в призабойной зоне за счет имплозии.*

**Ключевые слова:** нефтяная скважина, имплозия, синергия, проницаемость коллектора, коэффициент инжекции.

УДК 621.383

А.В. ГЕТЬМАН, аспірант,  
Т.О. КОВАЛЕНКО, студент

**Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»**

**РАДІАЦІЙНА СТІЙКІСТЬ БАГАТОКОМПОНЕНТНОЇ  
КОНТАКТНОЇ МЕТАЛІЗАЦІЇ ДАТЧИКА КООРДИНАТ СОНЦЯ**

*У цій роботі представлені результати розробки і дослідження радіаційної стійкості металізації сенсора куткових координат Сонця, який розроблений на основі звичайних фотоелектричних перетворювачів – сонячних батарей. У наші дні багатошарові сонячні батареї на основі  $A_3B_5$  активно розвиваються у сфері конструювання систем електроживлення космічних апаратів, але ще є доцільним використання кремнієвих сонячних батарей та сенсорів на основі кремнію в низькоорбітальних космічних апаратах та інших космічних застосунках. Дослідження на радіаційну стійкість проводили на сонячних елементах з  $n^+ - p - p^+$  структурою. Сенсор куткових координат Сонця піддавали дії потоку електронів з енергією 7 МеВ. Щільність прискореного потоку електронів складала  $3 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  в атмосфері. Значення поглиненої дози опромінення досягали 100 крад (Si).*

**Ключові слова:** сонячні батареї (комірки, елементи), фотоелектричні перетворювачі, радіаційна стійкість, час життя носіїв заряду, кремнієва пластина.

**Вступ**

У зв'язку з активним розвитком космонавтики у всьому світі більшість технічних інститутів та науково-дослідних організацій, такі як Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Токійського університету, університету Шинсю (Японія), компанія NPO InterCos, Данський політехнічний інститут [1], почали інтенсивну роботу по розробці космічних наносупутників (НС), як для наукових дослідів так і для комерційного використання. Тому на сьогодні є актуальною проблема розробки надійних, радіаційно стійких і водночас простих систем орієнтації наносупутників. Достовірно визначення кутової орієнтації наносупутника є запорукою успішного його функціонування.

Однією з таких систем є щільний Датчик координат Сонця (ДКС), який призначений для визначення кутового положення Сонця і незважаючи на порівняну простоту є досить точними. ДКС призначений для орієнтації сонячних батарей і для управління роботою системи терморегулювання космічного апарату.

З метою зменшення собівартості і масово-габаритних показників наносупутників (НС)

відмовляються від використання в їх системах орієнтації та стабілізації прецизійних датчиків кутової швидкості. У зв'язку з цим виникає необхідність максимально ефективно використовувати інформацію, що надходить з позиційних датчиків (магнітометр, датчик горизонту Землі, датчик координат Сонця), для отримання інформації про повний вектор стану наносупутника. Це також вплинуло на надання переваги використанню ДКС на космічних апаратах перед іншими системами орієнтації.

Предметом інтересу для фотоелектричної промисловості завжди залишалися надійні металеві контакти сонячних батарей. Окрім головних факторів впливу на деградацію параметрів ДКС, важливим фактором є радіаційна стійкість, термічна стабільність та електроміграція контактної металізації. Технологія формування радіаційно стійкої металізації ДКС на сьогодні є найменш дослідженою. Але для ДКС технологія та вимоги до формування радіаційно стійкої металізації подібні до монокристалічних інтегральних мікросхем (ІМС) та фотоелектричних перетворювачів (ФЕП) – сонячних батарей. Тому результати досліджень проведені над ФЕП справедливі і для ДКС, оскільки технології їх виготовлення подібні.

Одним з важливих чинників розробки датчика координат Сонця космічного призначення полягає в покращенні його радіаційної стійкості. Пошук нових матеріалів на основі структур  $A_3B_5$  показав гарний результат у збільшенні ефективності та радіаційної стійкості сонячних елементів та датчиків координат Сонця. Як показує практика досліджень (СРСР, США, Франція) по деградації космічних сонячних батарей так і ДКС під дією радіаційного опромінення, ступінь деградації суттєво залежить від орбіти космічного апарату (КА). Для низькоорбітальних КА (700 – 800 км) деградація сонячних батарей на основі кремнію та гетероструктур  $A_3B_5$  складає відповідно 15% та 5% протягом 5 років перебування КА на орбіті. Але оскільки кремній широко розповсюджений в природі, та його запаси для створення сонячних батарей, в порівнянні з арсенідом галію практично необмежені. Технологія виготовлення кремнієвих ФЕП постійно удосконалюється і є простішою ніж у створенні ФЕП на основі гетеропереходу арсеніду галія. Вартість кремнієвих ФЕП на порядок нижча за ФЕП на основі арсеніду галія. Тому з урахуванням попередніх факторів та зростанням попиту застосування КА на низьких орбітах на обмежений термін експлуатації, кремнієві ФЕП відіграють важливу роль.

#### **Вплив іонізуючого випромінювання на металізацію ДКС**

Для ДКС, який перебуває в агресивних зовнішніх умовах Космосу, найбільш вдалим виявилася багатокомпонентна контактна металізація. Шари багатошарової системи металізації можна класифікувати на основні, які визначають теплоелектричне функціонування ІМС в процесі експлуатації, і допоміжні технологічні, які необхідні на етапі формування системи металізації. До основних шарів відносяться контактний шар, дифузійно-бар'єрний шар, один або кілька рівнів алюмінієвих між'єднань або, іншими словами, провідних шарів.

Контактний шар – перший по відношенню до напівпровідника (кремнію) шар, що є найбільш відповідальним у системі металізації в плані створення приладів із заданими електричними характеристиками та надійністю. З точки зору можливості одночасного задоволення усім вимогам, в якості матеріалу КС найбільш прийнятними є силіциди перехідних металів – PtSi, TiSi<sub>2</sub>, CoSi<sub>2</sub> і NiSi.

Провідний шар – останній стосовно активної області напівпровідникового приладу і черговості нанесення шар, має забезпечувати високу електропровідність, стійкість до електроміграційних процесів при щільності електричного струму  $10^5 - 10^6$  А/см<sup>2</sup> і допускає приєднання зовнішніх дровових або об'ємних виводів до контактних майданчиків відомими методами. Вибір матеріалу провідного шару обмежується дуже невеликим колом насамперед по електропровідності: алюміній (2,65 мкОм·см), золото (2,25 мкОм·см), мідь (1,68 мкОм·см) і срібло (1,5 мкОм·см).

Дифузійно-бар'єрний шар – проміжний шар між контактним і провідним шарами, призначений для запобігання небажаній взаємодії між матеріалами цих шарів. Відомими матеріалами ДБС є тугоплавкі метали (Ti, W), сплави тугоплавких металів (Ti-W, Ti-W-N, Ta-Si-N, Ti-Si-N), хімічні сполуки тугоплавких металів (нітриди, карбіди).

До допоміжних технологічних шарів (ДТШ) можна віднести розкисляючий, адгезійний, антивідбиваючий та інші шари.

Пасивний ДБШ повинен зберігати хімічну інертність при контакті з верхніми та нижніми шарами А і С відповідно. В ідеальному випадку це проявляється в тому, що можливі його реакції з матеріалом А або С володіють позитивним значенням зміни ізобарно-ізотермічного потенціалу. Однак на практиці виконання цієї умови не завжди можливо. Тому, як правило, до числа ДБШ даного типу відносять матеріали, які мають велику негативну теплоту утворення, такі як нітриди, бориди і карбіди перехідних металів.

Як приклад ДБШ проти хімічних і твердофазних взаємодій можна навести нітрид титану TiN, який використовується в складі систем металізації з алюмінієвими між'єднаннями в технології кремнієвих ІС. Цей матеріал має теплоту утворення - 80,3 ккал/моль. Контактна система Al-TiN-TiSi<sub>2</sub>-Si являється стабільною при 550° С протягом 30 хв. Значна за швидкістю реактивна дифузія спостерігається при температурі ~600°С. Слід звернути увагу, що зазначена температура лише на 60°С нижче температури

плавлення макрооб'ємного алюмінію, а в рідкому стані алюміній стає надзвичайно хімічно активним. Причина деградації ДБШ TiN пов'язана з його взаємодією з алюмінієм з утворенням нітриду алюмінію і алюмінідів титану [2].

Незважаючи на широке використання нітриду титану, існують і інші ДБШ такого ж типу, які не поступаються за бар'єрним властивостям TiN. Відомо, що такі сполуки, як TiN, TaC, TaN, HfN, ZrN є ефективними бар'єрами по відношенню до алюмінію і кремнію щонайменше до тієї ж температури 550°C, що і TiN.

Прикладом ДБШ є бар'єр на основі титану. У ряді експериментальних робіт було показано, що титан залишається непоганим бар'єром між алюмінієм і кремнієм в процесі відпалу при 450°C протягом 30 хв. При 400°C алюміній і титан починають взаємодіяти з утворенням інтерметалічного з'єднання TiAl<sub>3</sub>. Проте проникнення атомів алюмінію в активну область напівпровідникового приладу не спостерігається до тих пір, поки плівка титану повністю не буде витрачена на утворення інтерметаліду. Аналогічним чином поведуться і інші тугоплавкі метали, зокрема вольфрам і тантал.

На швидкість протікання дифузійних процесів у тонких плівках істотний вплив мають різноманітні структурні недосконалості. Відомо, що дифузія уздовж кордонів зерен в полікристалічних матеріалах проходить повільніше, ніж дифузія уздовж міжфазної межі, і в порівнянні з об'ємною ґратковою дифузією протікає в десятки разів швидше [3].

Бар'єрними матеріалами проти дифузії є, перш за все, аморфні сплави перехідних металів. Для аморфного стану характерна ідеальна атомно-структурна однорідність, а відсутність дефектів кристалічної будови (дислокацій, вакансій, кордонів зерен і т.д.) зумовлює виключно високу хімічну інертність аморфних плівок, їх малу дифузійну проникність і високу термічну стабільність. Відомими бар'єрними матеріалами проти дифузії є аморфні сплави Ta-Si-N, Ti-Si-N, W-Si-N, які ефективні проти взаємної дифузії як кремнію і алюмінію аж до температури плавлення алюмінію, так і кремнію та міді до температур ~600-700°C [4 - 8]

У роботі [9] вивчалися і порівнювалися бар'єрні властивості шарів аморфного W<sub>46</sub>N<sub>54</sub> і полікристалічного W<sub>76</sub>N<sub>24</sub> між кремнієм і міддю. Було виявлено, що стабільність аморфного бар'єрного шару W<sub>76</sub>N<sub>24</sub> при відпалі у вакуумі зберігається до 750°C, при цьому стабільність полікристалічного шару W<sub>46</sub>N<sub>54</sub> виявляється на 50-100°C нижче.

Іншим видом бар'єрних матеріалів проти дифузії є так звані заповнені бар'єри, що представляють собою полікристалічні матеріали з пасивованими межами зерен. Дія таких бар'єрів полягає у зменшенні енергії меж зерен в результаті накопичення домішок на межах зерен, тобто ефекту міжзернової сегрегації. В даний час надійно встановлений факт істотного поліпшення дифузійно-бар'єрних властивостей ряду сплавів тугоплавких металів, наприклад сплаву Ti-W, шляхом введення в плівку ДБШ контрольованої кількості кисню або азоту до концентрації ≤ 10-3 вагового %.

Призначення адгезійного шару (АШ) – забезпечення високої адгезії, тобто зчеплення металевих шарів з діелектричними поверхнями (SiO<sub>2</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, фосфор-силікатним склом, поліімідом тощо) та іншими контактуючими елементами системи металізації інтегральних схем. Як матеріал АШ використовуються метали з високою електронною спорідненістю до кисню або високою теплою утворення оксидів ( $\Delta H_f \leq -150$  ккал/моль), такі як титан, ванадій, хром. Наявність АШ необхідно, коли в складі системи металізації використовуються шари благородних металів (Pt, Pd, Ir та ін), не схильні до утворення оксидів. При цьому один АШ потрібен під шаром благородного металу для забезпечення його адгезії з діелектричним матеріалом, і в цьому випадку АШ залишається складовою частиною системи металізації при експлуатації ІС; другий АШ потрібен над шаром благородного металу для забезпечення високої адгезії фоторезисту з ним на етапі фотолітографічного формування топології малюнка, і в цьому випадку АШ може видалятися після проведення операції.

Розкислюючий шар (РШ) – це тонкий шар хімічно активного по відношенню до кисню металу (Ti, Zr, Hf, Ta, Mo), завдання якого - очищення поверхні напівпровідника від кисню та інших домішок, що забезпечує, наприклад, отримання якісних силіцидів з гладкою міжфазною межею силіцид-кремній при взаємодії силіцидоутворюючого металу та кремнію. У процесі вказаної взаємодії РШ витрачається, і продукти його згодом хімічно видаляються разом із залишками непрореагованого силіцидоутворюючого металу.

Антивідбиваючий шар (АВШ) – шар з низьким коефіцієнтом відбиття, необхідний на етапі фотолітографії при суміщенні малюнка фотошаблону із раніше створеним на підкладці топологічним малюнком інтегральної схеми. Антивідбиваючий шар може видалятися після проведення цієї операції.

Стоп-шар – тонкий шар, який потрібний для зупинки процесу «сухого» травлення. Наприклад, цей шар потрібен при одночасному відкритті контактних вікон («колодязів») до областей затвора та стоку-витоку МДП-транзисторів для запобігання травлення затвора, оскільки товщина ізолюючого шару, в якому розкриваються вікна, над затвором істотно менше, ніж над областями стоку-витоку, а селективність процесу «сухого» травлення недостатня.

Змочуючий шар – тонкий шар, що сприяє безпустотному, однорідному заповненню провідним

матеріалом канавок (траншів) і контактних колодязів в міжрівневому діелектрику та підвищуючий термічну стабільність і електроміграційну стійкість провідного шару. [ 10 ]

Дотримання співвідношення товщин шарів металізації має великий вплив на стабільність та радіаційну стійкість металізації.

Часто, відмова або зниження якості ФЕП викликана погіршенням електричних контактів біля р-п переходу в процесі технологічних кроків, пов'язаних з високотемпературними процедурами. Наприклад, пакувальні процеси сонячних елементів, призначених для використання у відкритому космосі може потребувати електростатичної стадії з'єднання для заміни адгезиву, який використовується для кріплення тонкого шару скла до ФЕП. Дане скляне покриття складає близько 150 мкм завтовшки і захищає ФЕП від ушкодження енергетичних частинок (в основному протонів в діапазоні 100 кеВ), а також збільшує коефіцієнт випромінювання ФЕП в інфрачервоному діапазоні, тим самим знижуючи робочу температуру ФЕП. У електростатичному процесі з'єднання, схему металізації піддають термообробці при температурі 600° С протягом 10 хв. При таких підвищених температурах, атомарна взаємна дифузія відбувається через метал-напівпровідник і присутність металевих домішок поблизу р-п переходу може погіршити механізми фотоелектричного перетворення шляхом формування центрів рекомбінації. У деяких важких випадках проникнення металу через р-п перехід може навіть повністю закортити перехід повністю. Ці проблеми особливо актуальні для сонячних батарей із вузьким переходом (~ 2000 Å), яким часто надають перевагу через їх ефективність.

Щоб вирішити цю проблему взаємної дифузії, застосовують перспективну концепцію дифузійних бар'єрів в схемах металізації для сонячних ФЕП. Ідея полягає в тому, щоб вставити матеріал "X" дифузійного бар'єру між шарами А і В таким чином, що небажана термодифузія пригнічується, в той час як електричні та механічні властивості структури «А-Х-В» залишаються незмінними або, принаймні, еквівалентні металевій комбінації «АВ». Важливим аспектом концепції дифузійного бар'єру є звільнення конструктора від різних металургійних обмежень. Оскільки вибір металів, як правило, диктується із металургійних та переробних міркувань, застосування відповідного дифузійного бар'єру може забезпечити більшу різноманітність у виборі матеріалів. [11]

В якості матеріалу для ДБШ було взято нітриду титану (TiN) через його низький електричний опір і високу хімічну стабільність. Шар олова між Ti і Pt шарами у схемі металізації застосовувався для польових транзисторів з ізольованим затвором [12]. Результати показали, що дифузія Pt в Ti ефективно блокується під час термічної обробки протягом 30 хв при 450°С. У системі Au-Pt-Ti для приладів з балочними виводами [13] було показано, що введення шару олова товщиною 100 Å між Ti і Pt може інгібувати утворення інтерметаліду TiPt. Також було продемонстровано термічну стабільність TiN в якості дифузійного бар'єру при 600°С для тонких (~2000Å) контактів Si сонячних ФЕП.

Досліджувані зразки - Si ФЕП 2x2 см n<sup>+</sup>-на-р з глибиною переходу ~2000Å. n<sup>+</sup> шар був вибраний легований фосфором. Підкладка р-типу, легована бором (~10 міл завтовшки), вирощена методом Чохральського і покрита шаром Ag товщиною 4 мкм в якості заднього контакту. У цьому техніко-економічному обґрунтуванні, спеціальний шаблон металізації на ФЕП складається з паралельних полосок близько 1 мм в ширину і на відстані ~1 мм одна від одної. Процедури механічного маскування використовувалися для визначення залежностей під час осадження олова та випаровуванні металу.

Тонкі плівки TiN були приготовлені в камері ВЧ-розпилення, зарядженій планарними мішенями (чистий Ti) для магнетронного розпилення діаметром 7,5 см. ВЧ розпилення з потужністю 1 кВт та тиском азоту – 70 мТл, було використане для реактивного розпилення TiN, з типовою швидкістю осадження ~100 Å/хвилину. Різні товщини TiN були отримані шляхом варіювання часу осадження. Питомий електричний опір шарів TiN було порядку 500 μΩ/см. Хоча низький питомий опір може бути отриманий за більш високої потужності розпилення і більш низькому тиску азоту, було виявлено, що адгезія TiN з кременієм є задовільною тільки при більш високому тиску азоту. Незважаючи на більш високий об'ємний опір TiN (приблизно в 4 рази вищий, ніж у осаджених плівок Ti), система TiN-Ti-Ag має продуктивність ВАХ порівнянну з металізаційною системою Ti-Pd-Ag при випробуванні на p<sup>+</sup>-на-р сонячних ФЕП. Це відбувається тому, що ефективний послідовний опір R<sub>s</sub> ФЕП переважає контактний опір вздовж межі розділу метал-Si і послідовного опору вздовж металевих смуг. Якщо взяти шар Ag товщиною 4 мкм та довжиною 1 см в якості основного провідника, то вплив на R<sub>s</sub> опору по товщині TiN (1000-2000 Å) буде нікчемний.

Схема шарів металізації показана на рис. 1. Після осадження шару TiN (від 500 до 2000 Å в товщину), тонкий шар Ti (~ 1000 Å) випаровувався зверху на TiN в окремій камері випаровування, а за ним шар Ag товщиною 4 мкм. Шар Ti використовувався для поліпшення адгезії між Ag і TiN. Щоб уникнути проблем реєстрації маски, смуги Ti та Ag були нанесені тільки 1/2 мм в ширину, таким чином, що вони не перекивали край шару TiN.

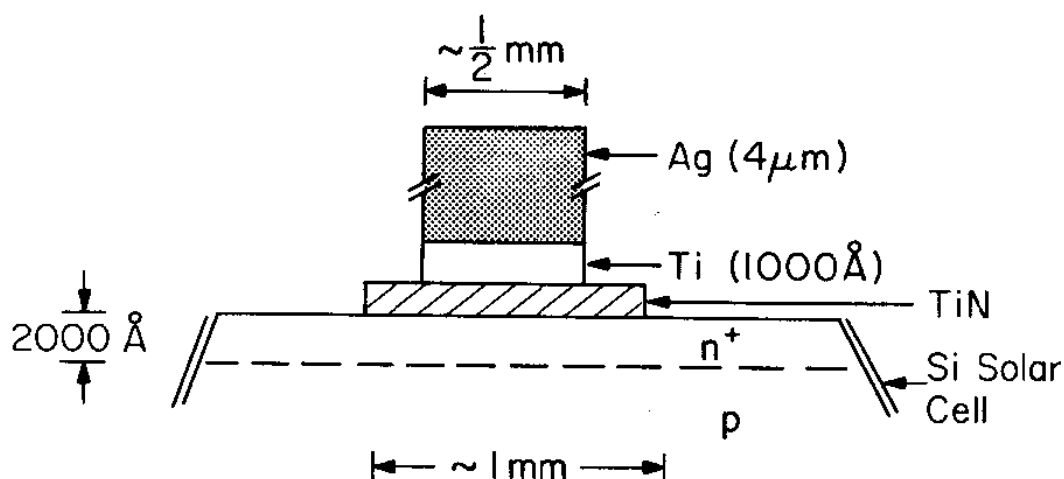


Рисунок 1 – Схема металізації системи TiN-Ti-Ag на Si сонячному елементі.

Відпалу при 600°C проводився у виробничих умовах у середовищі азоту. Не було приділено особливої уваги сухості азотного середовища або присутності кисню при відпалі. Після 10 хвилинної термообробки при 600°C всі ФЕП піддавали спіканню при 400°C протягом 10 хв, щоб мінімізувати опір контакту між металізацією та Si.

Для порівняння: стандартні зразки без шару TiN (тобто, система металізації Ti-Ag) були також підготовлені і пройшли термообробку при 600°C протягом 10 хв. Результати вимірювань ВАХ під дією АМО випромінювання показані на рис. 2. Значення  $V_{oc}$  (напруга холостого ходу) та  $I_{sc}$  (струм короткого замикання) і коефіцієнт заповнення (філфактор) значно зменшилися після термічного відпалу. Результати наступного аналізу показали, що зміна шунтуючого опору  $R_{sh}$  p-n переходу та системи металізації призводить до відповідної зміни послідовного опору  $R_s$ . Причиною зменшення  $R_{sh}$  є той факт, що p-n перехід може або бути забруднений або навіть коротко замкнутий локально через наявність металічних частинок (елементів). Змішування Si-Ti-Ag може привести до збільшення  $R_s$  через збільшення опору в контакт з Si та/або питомого опору металевих плівок при формуванні трьохкомпонентного сплаву. Це спостереження добре узгоджується з попередніми дослідженнями дифузії, що засвідчили про теплову нестійкість системи Si-Ti-Ag при 600°C.

Також ВАХ сонячних елементів із системою металізації TiN-Ti-Ag вимірювали під дією АМО освітлення (випромінювання) до і після 600°C, 10 хв відпалу. Для TiN товщиною від 750 до 1700 Å, ніякої деградації  $V_{oc}$  не було виявлено, що вказує на те, що  $R_{sh}$  залишається постійним під час термічної обробки. Проте, коефіцієнт заповнення (філфактор) ВАХ показує, що товщина шару TiN зменшується із зменшенням кількості TiN шарів. При товщині TiN більше 1700 Å, змін у  $V_{oc}$  та  $I_{sc}$  не спостерігається, і коефіцієнт заповнення (філфактор) може бути виявлений після відпалу при 600°C (рис. 3). Таким чином, з досить товстим шаром TiN, нормальний режим Si ФЕП, після високотемпературної обробки, можна обійти без втрат в електричних характеристиках ФЕП.

Таким чином, було показано, що TiN плівки можуть бути використані як дифузійний бар'єр при високотемпературній обробці. Зокрема, в Si сонячні елементи з системою металізації TiN-Ti-Ag на тонкому переході (~2000 Å) не спостерігається погіршення характеристик після 600°C, 10 хв термообробки, якщо товщина шару TiN складає  $\sim$  1700 Å. На практиці застосовують шар Pd товщиною 500 Å, який затиснутий між шарами Ti і Ag, для пасивації електрохімічної реакції між Ti і Ag, коли ФЕП піддаються впливу вологи (пари).

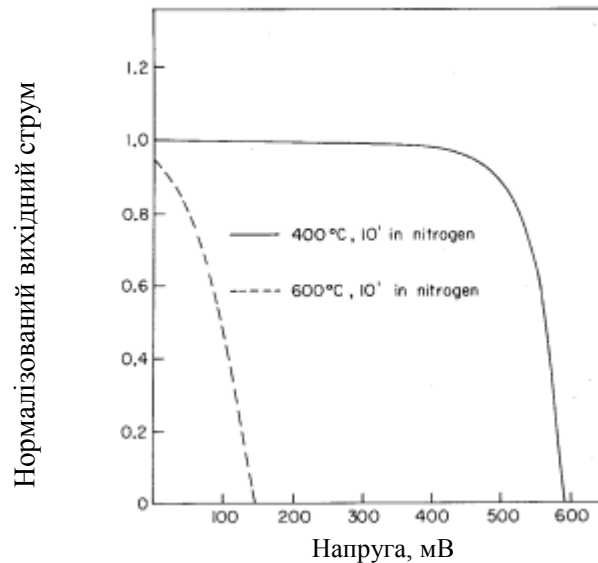


Рисунок 2 – ВАХ тонкого переходу ( $\sim 2000 \text{ \AA}$ ) Si сонячних елементів із системою металізації Ti-Ag під дією АМО випромінювання. Суцільна лінія показує продуктивність ФЕП після 10 хв відпалу при  $400^\circ\text{C}$ . Пунктирна лінія показує деградацію після 10 хв термічної обробки при  $600^\circ\text{C}$ .

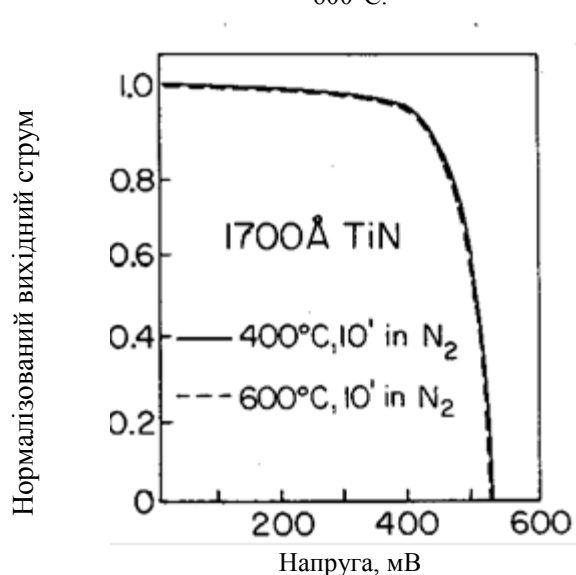


Рисунок 3 – ВАХ тонкого переходу ( $\sim 2000 \text{ \AA}$ ) Si сонячних елементів із системою металізації TiN-Ti-Ag до (суцільна лінія) і після (пунктирна лінія) 10 хв відпалу при  $600^\circ\text{C}$ . Товщина шару TiN складає  $\sim 1700 \text{ \AA}$ . ВАХ вимірювалися під АМО випромінюванням.

### Висновки

В результаті проведення аналізу результатів експериментальної роботи (дослідження радіаційної стійкості багатокомпонентної металізації та впливу на електрофізичні характеристики кремнієвого сонячного).

Контактна металізація (напилена) на лицевій стороні складається із 3-х шарів: 1) контактний шар – титан (товщ.  $\sim 20 \div 30 \text{ нм}$ ); 2) антидифузійний шар – паладій, платина, молібден (товщ.  $\sim 5 \div 15 \text{ нм}$ ); 3) провідний шар – срібло (товщ.  $\sim 200 \div 300 \text{ нм}$ ).

Для забезпечення формування якісних металевих плівок і контактної металізації в цілому, яка у повній мірі задовольнила б вимоги фотоелектричних перетворювачів (ФЕП) як відносно електрофізичних властивостей так і експлуатаційних їх параметрів потрібно виконати ряд вимог: 1) вакуум у камері повинен бути не нижчим ніж  $5 \cdot 10^{-6} \text{ мм.рт.ст.}$ ; 2) інтервал між напиленням металів повинен бути мінімальним, реально він повинен становити не більше 150 с; 3) час напилення металевих плівок повинен бути оптимізованим, що забезпечить як якість металевої плівки так і якість

технологічного процесу «зривної» літографії в цілому, реально, наприклад, при напиленні металів на установці ВАК 600 він повинен бути в межах: Ti -  $\sim 20$  с; Pd -  $\sim 10 \div 15$  с; Ag -  $\sim 100 \div 150$  с.

Найоптимальнішими технологічними процесами формування металевих плівок контактної металізації є: для Ti, Pd, Pt, Mo – електронно-променеве напилення; Ag – електронно-променеве напилення або термічне розпилення. Допустимо напиляти металеві плівки магнетронним розпиленням, але при цьому товщина плівки Ag не може перевищувати 200 нм.

Для оптимізації технологічних процесів напилення металів, наприклад електронно-променевим напиленням на установці ВАК 600, електронно-променева гармата повинна функціонувати у наступних режимах: 1) прискорююча напруга  $\sim 12$  кВ, 2) струм променя: для Ti  $\sim 100$  мА, для Pd  $\sim 150$  мА, Ag  $\sim 120$  мА, Mo  $\sim 200$  мА.

Температура підкладки при напиленні металів за умови забезпечення технологічного процесу «зривної» літографії повинна бути в межах –  $20 \div 80^\circ\text{C}$ .

### Література

1. <http://www.nkau.gov.ua/nsau/newsnsau.nsf/NewsallU/71438EC2E2BF8C64C2257758002DC09F?OpenDocument&Lang=U>
2. Сейдман Л.А. Реактивное нанесение в вакууме слоїв нитрида титана и применение их в системах контактной металлизации полупроводниковых приборов: Обзоры по электронной технике. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. - М.: ЦНИИ «Электроника», 1988. - Вып. 6.
3. Тонкие пленки. Взаимная диффузия и реакции / Под ред. Дж. Поута, К. Ту, Дж. Мейера. - М.: Мир, 1982. - 576 с.
4. Kohn A., Eizenberg M., Shacham-Diamand Y. et al. Evaluation of electroless deposited Co (W, P) thin films as diffusion barriers for copper metallization // Microel. Eng. - 2001. - Vol. 55. - P. 297 - 303.
5. Wang S.-Q., Raaijmakers I.J., Burrow B.J et al. Reactively sputtered TiN as a diffusion barrier between Cu and Si // J. Appl. Phys. - 1990. - Vol. 68. - P. 5176 - 5187.
6. Brizoual L. Le, Guilet S., Lemperiere G. et al. Analysis of Ti-Si-N diffusion barrier films obtained by r.f. magnetron sputtering // Microel. Eng. - 2000. - Vol. 50. - P. 509 - 513.
7. Riedel S., Schulz S.E., Baumann J. et al. Influence of different treatment techniques on the barrier properties of MOCVD TiN against copper diffusion // Microel. Eng. - 2001. - Vol. 55. - P. 213 - 218.
8. Reid J.S., Kolawa E., Ruiz R.P., Nicolet M.-A. Evaluation of amorphous (Mo, Ta, W)-Si-N diffusion barriers for <Si>|Cu metallizations // Thin Solid Films. - 1993. - Vol. 236. - P. 319 - 324.
9. Lin C.-L., Ku S.-R., Chen M.-C. Reactively Sputtered Amorphous TaSixNy Films Serving as Barrier Layer Against Copper Diffusion // J. Appl. Phys. - 2001. - Vol. 40. - P. 4181 - 4186.
10. Громов Д.Г., Учебное пособие по дисциплине «Металлизация в системах с наноразмерными элементами». - М.: МИЭТ, 2011. - 204 с.: ил.
11. N.W. Cheung, H. von Seefeld, M.-A. Nicolet F. Ho, P. Lies, Thermal stability of titanium nitride for shallow junction solar cell contacts.
12. P. R. Fournier, U. S. Patent 3 879 746 (1975).
13. W. J. Garceau, P. R. Fournier, and G. K. Herb, Thin Solid Films 60, 237

A. Getman, graduate student,

T. Kovalenko, student

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"

### RADIATION RESISTANCE OF CONTACT MULTICOMPONENT METALLIZATION OF SENSOR OF COORDINATES OF THE SUN

*This paper presents the results of research and development of radiation resistance metallization sensor angular coordinates of the Sun, which is developed on the basis of conventional photovoltaic cells - solar cells. Nowadays, multi-layer solar cells based on A3B5 actively developed in the design of systems of power spacecraft, but is it appropriate to use silicon solar cells and sensors based on silicon LEO spacecraft and other space applications. Research on radiation resistance was performed on solar cells with n + - p - p + structure. Sensor angular coordinates of the sun exposed to the flow of electrons with an energy of 7 MeV. The density of the accelerated electron flux was  $3 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  in the atmosphere. The value of the absorbed radiation dose reached 100 steels (Si).*

**Keywords:** solar cells ( cell components ), photovoltaic cells, radiation resistance, the lifetime of charge carriers, silicon wafers.

А.В. ГЕТЬМАН, аспирант,  
Т.О. КОВАЛЕНКО, студент

### РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ КОНТАКТНОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ ДАТЧИКА КООРДИНАТ СОЛНЦА

*В этой работе представлены результаты разработки и исследования радиационной стойкости металлизации сенсора угловых координат Солнца, который разработан на основе обычных фотоэлектрических преобразователей - солнечных батарей. В наши дни многослойные солнечные батареи на основе АЗВ5 активно развиваются в сфере конструирования систем электропитания космических аппаратов, но еще целесообразно использование кремниевых солнечных батарей и сенсоров на основе кремния в низкоорбитальных космических аппаратах и других космических приложениях. Исследования на радиационную стойкость проводили на солнечных элементах с  $n + -p - p +$  структурой. Сенсор угловых координат Солнца подвергали воздействию потока электронов с энергией 7 МэВ. Плотность ускоренного потока электронов составляла  $3 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$  в атмосфере. Значение поглощенной дозы облучения достигали 100 крад (Si).*

**Ключевые слова:** солнечные батареи (ячейки, элементы), фотоэлектрические преобразователи, радиационная стойкость, время жизни носителей заряда, кремниевая пластина.

УДК 621.383.51 А.В.

А.В. ГЕТЬМАН, аспирант,  
Д.В. ОЛЕФИРЕНКО, студент

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

### ВЛИЯНИЕ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ НА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТАХ

*В этой работе были представлены результаты разработки и исследования кремниевых космических солнечных батарей. В наши дни  $A^3B^5$  многослойные солнечные батареи активно развиваются в сфере конструирования систем электропитания космических аппаратов, но для низкоорбитальных космических аппаратов использование солнечных батарей из кремния еще целесообразно. Исследования проводили на солнечных элементах с  $n^+ - p - p^+$  структурой. Кремниевые солнечные элементы подвергали воздействию потока электронов с энергией 7 МэВ. Плотность потока ускоренных электронов была  $3 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$  в атмосфере. Поглощенная доза облучения была до 100 крад (Si).*

**Ключевые слова:** солнечный элемент, фотоэлектрический преобразователь, радиационная стойкость, время жизни носителей.

#### Введение

Альтернативные источники энергии, таких как энергия солнца, привлекают все большее внимание во всем мире. Постоянно увеличивающийся объем космических исследований ставит каждый раз новые технические задачи, требующие быстрого и эффективного решения. Одной из основных проблем является энергоснабжение космических аппаратов. В настоящее время солнечные батареи являются практически единственным источником электроэнергии, используемым на спутниках и космических аппаратах со сроком службы более двух-трех месяцев. Часто они применяются и на относительно короткоживущих объектах. Стойкость солнечных элементов к радиационному облучению определяет срок службы солнечных батарей и, соответственно, самих космических аппаратов.

Как показали многолетние исследования (СССР, США, Франция) по деградации космических СБ под действием радиационного облучения, степень деградации существенно зависит от параметров орбиты космического аппарата (КА). Для низкоорбитальных КА (770 км) деградация СБ на основе кремния и гетероструктур GaAs-GaAlAs составляет соответственно 15% и 5% в течение 5 лет пребывания КА на орбите. Для КА на геостационарных орбитах деградация составляет 31% (Si) и 16% (GaAs) в течение 15 лет пребывания на орбите. Для радиационно-опасных орбит (7400 км при угле наклона  $50^\circ$ ), деградация оставляет 49% (Si) и 22% (GaAs) в течение 5 лет пребывания на орбите [1]. То есть для низкоорбитальных космических аппаратов использование кремниевых солнечных батарей является еще целесообразно из-за существенной разницы в стоимости.

Опыт эксплуатации солнечных батарей на спутниках показал, что существующие в околоземном космическом пространстве потоки корпускулярной радиации оказывают сильное разрушающее влияние