

**КОНСТРУКТИВНО – ТЕХНОЛОГІЧНІ РІШЕННЯ ВИГОТОВЛЕННЯ  
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ****А. О. Ніконова, О. Ю. Небеснюк, З. А. Ніконова**

Інженерний навчально – науковий інститут Запорізького національного університету

**ORCID: 0000-0002-5714-7543; 0000-0003-4839-0258; 0000-0001-7944-5974**

Сонячна енергетика представляє розумну альтернативу використанню теплових, хімічних та ядерних джерел струму. За своїм енергетичним ресурсом сонячне випромінювання цілком здатне задовольнити зростаючі потреби людства. Актуальною проблемою на сьогодні є розробка і виготовлення високоефективних та економічних фотоперетворювачів (ФП) з достатньою радіаційною стійкістю. У зв'язку з цим потрібні нові технології і матеріали. Завдяки високій ефективності, температурній стабільності та малій чутливості до радіаційного опромінення фотоперетворювачі на основі гетероструктур є найбільш перспективними для використання. У статті запропонована технологія виготовлення фотоперетворювачів на основі кремнієвих структур з гетеропереходами типу  $\text{ITO} / n\text{-Si} / n + \text{-Si}$ . Отримання цих шарів методом пульверизації на поверхні кремнієвих пластин спирається на результати визначення оптимальних значень температури нагріву, швидкості осадження і течії газового струменя з сопла пульверизатора, товщини шару ITO, концентрації  $\text{InCl}_3$  до  $\text{SnCl}_4$  в спиртовому розчині, а також інших факторів. Виявлені технологічні особливості отримання цих шарів методом пульверизації дозволяють поліпшити електрофізичні характеристики фотоперетворювачів, їх надійність при експлуатації і коефіцієнт корисної дії до 25% -30%.

**Ключові слова:** технологія, фотоелектроніка, перетворювачі, структура, гетероперехід, параметри, характеристики

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** Відновлення економіки за рахунок розвитку сучасного бізнесу вимагає більшого зростання енергетичних ресурсів, які, згідно з науковими дослідженнями, швидко зменшуються. У багатьох країнах для вирішення енергетичних завдань беруться короткострокові і довгострокові програмісти. Відомо, що ядерна енергетика сприяє забезпеченню нашої країни ресурсами, хоча при цьому необхідно вживати запобіжні заходи. За останні роки скоротився видобуток вугілля, який небезпечний і пов'язаний із забрудненням довкілля. Ресурсів природного газу зараз вистачає, але його транспортування і доставка дуже дорогі. Саме тому використанню альтернативних джерел енергії, таких як сонце і вітер, приділяється велика увага і успішно розвивається в нашому регіоні.

Найбільший розвиток фотоелектрична промисловість отримала в Європі, де зосереджено 68% світової енергетики. Лідером в регіоні є Німеччина, де розташовано її 33%, потім Італія, Іспанія і Франція. Серед неєвропейських країн у 2020 році в Китаї, США і Японії розташовувалися потужності сонячної енергетики до 7-10 ГВт. Останніми роками стрімкий розвиток сонячної енергетики відбувається саме в Китаї, де сумарна потужність фотоелектричних станцій за два роки зросла в 10 разів - з 0,8 ГВт в 2017 році до 8,3 ГВт у 2019 році. Політика розвитку програми «Мокрі роботи для 21 століття» (REN21) привела в 2020 році до встановлення в світі потужності понад 255 ГВт за рахунок сонячної енергії (велика частина знаходиться в Китаї). У структурі потужностей важливе місце займають станції підігрівання води і повітря.

Найбільш розвинений ринок фотоелектроенергетики в житлово-комунальному секторі, планований обсяг якого становить близько 10 млн. сонячних дахів (середня енергетична потужність даху - 3 кВт і середня світова ціна такого даху - \$ 17 000), тобто

обсяг світового ринку в цьому сегменті становить до теперішнього часу 170 млрд. доларів. Це цілком сформований сегмент світового ринку фотоенергетики, який швидко розвивається, причому зростаючими темпами. У даний час сонячні дахи в основному створюються на основі кремнієвих сонячних фотоперетворювачів. Основними замовниками є жителі міської та сільської місцевості в розвинених країнах, а також в державах з високим рівнем сонячної інсоляції. В Україні ринок ФП у житлово- комунальному секторі не існує в зв'язку з відсутністю національної програми розвитку фотоенергетики і законодавчої бази, що стимулює розвиток цього сектора. Однак перспектива його розвитку для України очевидна, у зв'язку з безперервним підвищенням цін на електроенергію і географічним розташуванням країни, де 3/4 населення (30 млн.) проживає в регіонах з високим рівнем сонячної радіації. Очікується, що протягом найближчих 20 років сонячна фотоенергетика створить більше 2 млн. робочих місць, скоротить викиди парникових газів в атмосферу на 350 млн. тонн  $\text{CO}_2$ , що еквівалентно зупинці 150 вугільних електростанцій.

Слід зазначити, що при розгляді перспектив великомасштабної сонячної електроенергетики витрата будь-яких, навіть самих звичайних, конструкційних матеріалів може бути економічно виправданий лише при високій ефективності перетворення в розрахунку на всю фотоприймальну поверхню. Це пов'язано з необхідністю покривати значні площі земної поверхні для перехоплення випромінювання при виробленні великих потужностей.

Очевидно, що пристрої перетворення повинні бути захищені від атмосферних впливів для забезпечення їх довгострокової (протягом 20-30 років) працездатності.

Напівпровідникові ФП дозволяють робити перетворення сонячної енергії безпосередньо в електри-

чну за допомогою гомо - або гетеропереходів. Близько 91% енергії падаючого світлового потоку перетворюється в електричний струм за рахунок вивільнення носіїв заряду з об'єму напівпровідника. Основою покращення їх якості є отримання високо-ефективних кремнієвих наноструктур, застосування яких значно підвищить коефіцієнт корисної дії ФП. У порівнянні з іншими джерелами енергії ФП мають значні переваги:

- При роботі немає викидів забруднюючих речовин у довкілля;
- Економія вугільного палива;
- Відсутність рухливих елементів, висока експлуатаційна надійність установки забезпечує термін служби 20 і більше років;
- Знижені експлуатаційні витрати;
- Модульний принцип системи (для збільшення потужності установки досить збільшити кількість панелей) відповідно до реальної потреби користувачів;

Однак слід зазначити їх недоліки :

- Висока питома вартість конструкції;
- Виробництво енергії непостійне із-за обертання Землі і погодних умов;
- Необхідність очищення поверхні фотоелектричних перетворювачів від пилу.

Автори вважають, що електричні втрати енергії можна зменшити за допомогою наступних методів:

- вибору оптимального кроку і товщини контактних шин на лицьовій поверхні для зниження послідовного опору ФП;
- пасивації лицьової поверхні для зниження швидкості поверхневої рекомбінації;
- пасивації тильної поверхні і створення ізотипних переходів;
- мінімізації площі контактів і додаткове легування приконттактних областей для зменшення рекомбінаційних втрат на межі розділу метал-напівпровідник;
- використання гетеруючих обробок, що збільшать час життя неосновних носіїв заряду;
- використання технологій, пов'язаних з отриманням просвітлюючих покриттів на кремнієвих структурах.

Нині напівпровідникові гетероструктури лежать в основі конструкцій сучасних сонячних батарей і ФП, транзисторів, джерел квантової електроніки, телекомунікацій, мікрохвильових печей, джерел електроживлення для систем зв'язку і освітлювальних приладів. При розробці елементної бази на основі цих переходів основна увага приділяється формуванню гетероепітаксійних шарів цих переходів, підвищенню їх якості (з використанням пластин більшого діаметру), освоєнню процесів легування гетероструктур. Оскільки при виробництві ФП на основі структур ІТО / n - Si / n + - Si широко використовуються технологічні прийоми і операції кремнієвих інтегральних схем (ІС), це дозволить забезпечити їх швидкий розвиток за рахунок вибору технологічних параметрів гетероструктури (матеріалу, товщини, порядку шарів і т.п.), можливість отри-

мання їх з необхідними характеристиками, а також поліпшити електрофізичні параметри і якість ФП.

Дійсно, в компанії IBM заявляють, що Si- технологія забезпечує збільшення швидкодії інструментальних конструкцій і ІС на 200-300%, а також високу якість ФП при мінімальному зростанні їх вартості. Наприклад, транзистори на основі структур ІТО / n - Si / n + - Si можуть виготовлятися як по біполярній, так і за технологією BiCMOS і CMOS. Найбільш перспективним напрямом використання приладових структур Si є телекомунікаційні системи. У разі виходу на ринок телекомунікаційних систем Si ІС з шарами ІТО можуть скласти конкуренцію не лише BiCMOS ІС і ІС на базі кремнієвих структур біполярних транзисторів, але й навіть галій-арсенідній ІС.

ККД вироблених в промислових масштабах фотоперетворювачів в середньому складає 16%, у кращих зразків досягає 25%. В лабораторних умовах компанія Sharp досягла ККД ФП 44,4%. Проте німецькі вчені з Інституту сонячної енергії суспільства Фраунгофера і Берлінського центру матеріалів і енергії імені Гельмгольца заявили про створення найефективнішого фотоперетворювача у світі, ККД якого складає 44,7%. Залежно від матеріалу, конструкції і способу виробництва ФП можна розділити на три покоління : ФП першого покоління на основі пластин кристалічного кремнію; ФП другого покоління на основі тонких плівок; ФП третього покоління на основі органічних і неорганічних матеріалів. Для підвищення ефективності перетворення сонячної енергії розробляються ФП на основі каскадних багат шарових структур. ФП першого покоління на основі кристалічних пластин на сьогодні отримали найбільше поширення. ФП першого покоління : монокристалічний кремній (n - Si); полікристалічний кремній (n - Si); на основі GaAs; технології (EFG, S - web); тонкошаровий кремній (Apex). Найбільшими виробниками ФП першого покоління є китайські компанії: Suntech Power, IA Solar, Yingli Green Solar, Solar fun Power, Trina Solar.

Технологія тонкошарового випуску ФП другого покоління полягає в пошаровому покритті вакуумним методом. Вакуумна технологія, в порівнянні з технологією виробництва кристалічних ФП, вимагає меншої енергії, і розвиток сонячних технологій у світі на цій основі також характеризується меншими інвестиціями.

Це дозволяє випускати гнучкий дешевий ФП з великою площею, хоча ефективність перетворення таких елементів нижча, ніж у ФП першого покоління. Типи ФП другого покоління : аморфний кремній (a - Si); мікро- і монокремній (mc - Si / nc - Si); кремній на склі (CSG); телурид кадмію (CdTe); (ди) селенід латуні (індію) –галію (CI(G) S).

Ідея створення ФП третього покоління полягала в зниженні вартості виробництва, відмові від використання дорогих і токсичних матеріалів на користь дешевих полімерів і електролітів, що переробляються. Важливою відмінністю є можливість покриття шарів методами друку, наприклад, за технологією "roll - to - roll" (R2R). Нині досліджується основна

частина проектів в області ФП третього покоління. Типи ФП третього покоління : фотосенсибілізовані забарвлення (ДБК); органічні (ОПВ); неорганічні (CN ZSS).

Останніми роками виробникам вдалося багатозово скоротити собівартість виробництва таких ФП, що забезпечило зміцнення їх позицій на світовому ринку.

Метою роботи була розробка технології виготовлення ФП на основі монокристалічного кремнію з гетеропереходами, які створювалися за допомогою прозорих оксидів (ППО), - шару ІТО.

Об'єкт і методи дослідження. Оскільки гетеропереходи відіграють велику роль при створенні сучасних електроприладів, з'являються новіші й модифіковані методи синтезу гетероструктур : гідротермальний метод [1, 2], зол-гель метод [3], MOVPE(чи MOCVD), металорганічні з'єднання, наплення з газової фази [4], лазерне наплення [5]. У кожному з цих методів ранжируються точність і швидкість зростання структури. Все залежить від того, який кінцевий продукт потрібний, перевага віддається тому або іншому способу синтезу або його модифікації. У зв'язку з великими перспективами розвитку високошвидкісної оптоелектроніки, усі методи синтезу спрямовані на отримання матеріалів з певними характеристиками. Нині можна виділити три основні властивості напівпровідникових гетероструктур : транспортну [6, 7], оптичну [7, 8] і фотокаталітичну [9–11].

Оскільки відмінність реальних гетеропереходів від ідеальних пов'язана з присутністю дефектів на поверхні розділу і в області просторового заряду, то наявність електрично активних станів на поверхні розділу реального гетероперехода призводить до наступних ефектів:

- заряджені стани деформують зонну структуру, піднімаючи або опускаючи стелю зони провідності у поверхні розділу по відношенню до рівноважного положення рівня Фермі;

- з'являються рекомбінаційні центри досить високої щільності, слідством чого стають великі спостережувані значення зворотних струмів насичення.

Встановлено, що у більшості випадків неідеальність переходу погіршує електрофізичні характеристики ФП, зменшуючи напругу холостого ходу і коефіцієнт заповнення вольт - амперної характеристики (ВАХ). Для створення приладів з заданими і стабільними характеристиками необхідно управляти як об'ємними властивостями обох матеріалів, так і властивостями поверхні розділу. Проте явища, пов'язані з поверхнею, не можна розглядати тільки як погіршення характеристик ФП. Навіть, змінюючи властивості поверхні розділу, можна розраховувати і на позитивні результати. Ймовірно, за рахунок поверхневих ефектів виникають додаткові перспективи поліпшення показників якості реальних ФП.

Нині завдяки поєднанню високої прозорості і провідності, матеріал ІТО використовується як основний у виробництві тонкошарових фотоперетворювачів, прозорих електродів рідкокристалічних екранів, органічних світлодіодів (OLED - Organic

Light Emitting Diode) і сенсорних екранів (Touchscreen), а також для створення прозорих електродів у напівпровідникових фотоприймачах. Інфрачервоні промені ІТО відбиває подібно до металевого дзеркала, що дає можливість використати його в теплозахисті. Також можна використовувати для створення покриттів, що проводять струм, та інших матеріалах, що захищають від електростатичних зарядів.

Встановлено, що одним із способів забезпечення високої прозорості і малого опору бар'єростворюючого металу, є використання для утворення бар'єру широкозонних, вироджених напівпровідників (ШВП), наприклад  $\text{In}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{In}_x\text{Sn}_y\text{O}_2$  (ІТО) і інші. Вони є важливими елементами фоточувливих приймачів. Основні вимоги, що пред'являються до них, - це максимальна прозорість і електропровідність при достатній механічній міцності і високій адгезії до підкладок.

Індієво-олов'яний окисел (indium - tin oxide - ІТО) є сумішшю оксиду індію (III) ( $\text{In}_2\text{O}_3$ ) і оксиду олова (IV) ( $\text{SnO}_2$ ), і, як правило, застосовується в співвідношенні 90%  $\text{In}_2\text{O}_3$  + 10%  $\text{SnO}_2$  по масі. При цьому вона є напівпровідником з провідністю n - типу, порівнянню з металеву, де іони олова служать донорами. У тонких шарах близько 200 нм, нанесених на скло при біля 400 °С, демонструється висока прозорість і вони мають поверхневий опір близько 6 Ом/квадрат. У порошковій формі, як відомо, індієво - олов'яний окисел (ІТО) жовто-зеленого кольору, прозорий і безбарвний і може бути осадженим (наприклад, на скло) у вигляді тонкої плівки в діапазоні товщини 1000-3000 ангстремів. У такому разі ІТО функціонує як прозорий і провідний електричний шар.

Аналіз методів нанесення оксиду індієво-олова показав, що це можливо залежно від необхідної прозорості і матеріалу підкладки. При нанесенні на скло, наприклад, використовується метод наплення у високому вакуумі, але при цьому підкладка, на яку наносять прозорі електроди, може нагріватися до 400 градусів С. Осадження ІТО на скло методом фізичного наплення (випаровуванням) може проводитися за допомогою магнетрона постійного струму або електронного променя. Рідше ІТО може входити до складу чорнила, використовуючи відповідний полімер і розчин, і наноситися на скло методом друку - хоча з нижчою прозорістю і провідністю в порівнянні з процесом фізичного наплення. Основна трудність в технології виготовлення ППО на кремнієвих структурах - необхідність поєднання двох суперечливих властивостей твердих тіл: прозорості, властивої діелектрикам і широкозонним напівпровідникам, і електропровідності, яка характерна для матеріалів, що сильно поглинають світло.

Нанесення ІТО на поверхню методом магнетронного наплення включає розміщення мішені магнетронного типу в робочій камері, створення основного магнітного поля і додаткового змінного магнітного поля, установку підкладки з боку напилуваної поверхні мішені, вакуумування робочої камери, подання аргону і кисню в камеру та негативного ресу-

рсу на мішень, створення магнетронного розряду і наплення мішені з нанесенням на підкладку, наприклад, пористого електропровідного покриття, у тому числі покриття, на основі оксидів індію і олова. Можливе використання додаткового змінного магнітного поля, яке створюється за допомогою селеноїда, підключеного до джерела струму, що управляється генератором для підвищення коефіцієнта використання маси.

Для нанесення пористого електропровідного покриття ІТО можна використовувати метод, який включає реактивне магнетронне наплення провідного шару індію-олова в атмосфері газової суміші, що містить інертний газ і кисень, а іонна стимуляція процесу відбувається потоком іонів. Таким чином, вміст кисню в газовій суміші складає 25-50%, а іонна стимуляція процесу нанесення покриття проводиться з енергією іонів 50-100 еВ, що дозволяє розширити діапазон технологічних параметрів отримання пористих електропровідних покриттів з високими оптичними і електричними характеристиками. Проте недоліком цього методу є деяке погіршення електричних характеристик із-за нанесеного цим методом пористого електропровідного покриття на підкладки з іншого матеріалу. Особливо треба звертати увагу при нанесенні півки ІТО на кремнієву підкладку. При використанні її у складі оптичного активного матеріалу це приведе до погіршення електрофізичних характеристик ФП і до значного скорочення їх терміну служби.

Встановлено, що в цьому випадку для виготовлення мішеней необхідно використовувати порошки оксиду індію з чистотою 99,9%. За результатами експериментів при малих значеннях  $\text{SnO}_2$  в мішені  $\text{SnO}_2$ :  $\text{In}_2\text{O}_3$  (від 0 до 10%) спостерігається зростання концентрації носіїв заряду. Це пояснюється тим, що  $\text{Sn}_4 + e$  донором, а при заміщенні  $\text{In}_3 + z$  з'являється зайвий електрон, що збільшує концентрацію вільних носіїв заряду. Потім в області вмісту  $\text{SnO}_2$  від 10 до 50% в мішені  $\text{SnO}_2$ :  $\text{In}_2\text{O}_3$  спостерігається монотонне зменшення концентрації носіїв заряду. Таким чином доведено, що найбільш оптимальним цільовим складом при отриманні тонких плівок ІТО є  $\text{SnO}_2$  - 10%,  $\text{In}_2\text{O}_3$  - 90%.

В цілому основна проблема утворення таких плівок полягає в тому, що в результаті випаровування на ерозійних ділянках поверхні мішені утворюються найменші виступи, які називаються наростами. Великі фрагменти залишаються на поверхні в розпошувальній камері, що викликано аномальним електричним розрядом і розбризкуванням із-за цих наростів. Такі фрагменти прилипають до сформованої півки і призводять до погіршення якості. Аномальний електричний розряд також може бути причиною нестабільного плазмового розряду, оскільки в цьому випадку неможливе стабільне випаровування. При створенні провідної півки на підкладці необхідно видаляти нарости, що потрапили в розпилювану мішень, оскільки це значно знижує продуктивність і якість ФП. Таким чином встановлено, що для проведення експериментальних досліджень потрібна мішень, яка не робить наростів або аномальних еле-

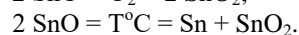
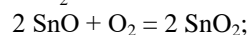
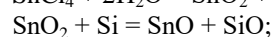
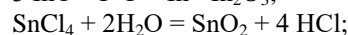
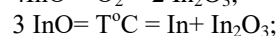
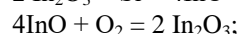
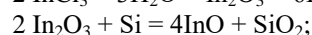
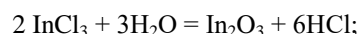
ктричних розрядів і готова до стабільного обприскування.

Крім того, пористі провідні покриття (ППП) з використанням оксиду індію можна отримати за рахунок використання магнетронного методу для розпилювання мішені, виготовленої з металевого сплаву. Однак такий метод вимагає точного збереження парціального тиску кисню в робочому газі, тому потрібні складні облаштування контролю викиду плазми. Для сучасних ФП і оптоелектронних пристроїв потрібні більш високі і стабільні характеристики, які не забезпечуються при використанні вибухозахищених мішеней. Виходом з цієї ситуації автори вважають може бути використання оксидно-керамічних мішеней, виготовлених методами порошкової металургії. Це дозволяє точно контролювати початковий матеріал, його склад і відмовитися від контролю складу робочого газу. Для дотримання стехіометрії в робочий газ необхідно додавати 5-4% кисню. Основна трудність при створенні технології РСС на кремнієвих структурах полягає в необхідності поєднання двох протилежних за змістом характеристик твердих тіл: пористість, властива діелектрикам і напівпровідникам з великою площею поверхні, і провідність, характерна для матеріалів, що значно поглинають світло.

Тонкі провідні оксидні плівки, такі як  $\text{In}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SnO}_2$ , прийнятніші, ніж металеві, оскільки мають високу твердість і адгезію до різних підкладок, стійкість до дії агресивних середовищ, прозорість у видимій області спектру і високу електропровідність. При цьому для отримання тонких ППО можна використати різні методи: перші - включають хімічні реакції, що протікають на поверхні підкладки, другі, - випаровування у вакуумі і катодне розпилення, треті - іонні пучки.

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.** Авторами запропонована технологія виготовлення ФП на основі кремнієвих структур з гетеропереходами типу ІТО/n-Si/n+Si. Отримання таких шарів методом пульверизації на поверхні кремнієвих пластин спирається на результати визначення оптимальних значень температури нагріву, швидкості осадження і товщини шару ІТО, швидкості витікання газового струменя з сопла пульверизатора, концентрації  $\text{InCl}_3$  до  $\text{SnCl}_4$  в спиртовому розчині і співвідношення  $\text{InCl}_3$  до  $\text{SnCl}_4$  в нім, а також інших чинників, що впливають на електрофізичні і оптичні характеристики ІТО.

Утворення шарів  $\text{In}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SnO}_2$  здійснювалося за наступними реакціями:



Встановлено, що до числа чинників, що впливають на характеристики шару ІТО, відносяться також: форма сопла, що визначає характер витікання струменя; розміри і форма крапель; наявність(відсутність) захисного екрану навколо робочої зони, в якій відбувається осадження шару і його розміри; тривалість паузи між черговими поданнями струменю, пов'язані з величиною теплоємності газу - носія і змінами температури підкладки впродовж періоду подання газового струменя; характер рельєфу поверхні підкладки; характер розподілу температури по поверхні підкладки в процесі осадження шару.

В ході експериментальних досліджень товщина бар'єроутворюючого напівпровідника змінювалася в межах 400 - 1500Å, а опір плівки від 50 до  $5 \cdot 10^4$  Ом/квдрат. Виявилось, що температура підкладки істотно впливає на електрофізичні властивості плівки. Це видно з рис. 1, де показана залежність поверхневого опору  $R_s$  плівки ІТО завдовжки 100нм, яку отримано методом пульверизації, від температури підкладки.

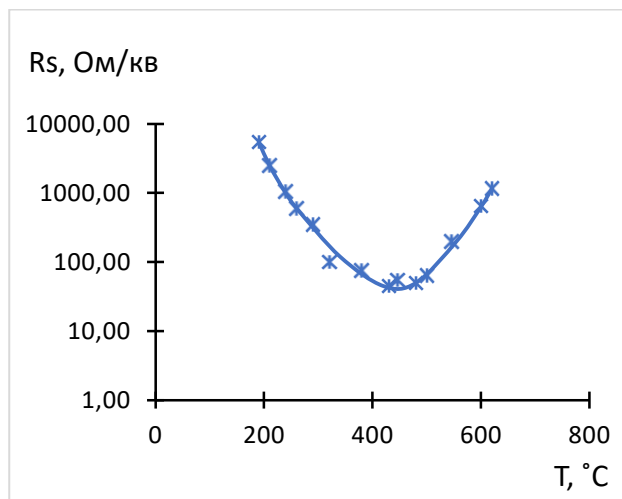


Рисунок 1 – Залежність поверхневого опору від температури

Плівки, що отримуються при відпрацюванні режиму їх осадження, мали різну мікроструктуру, яка визначалася цими умовами. При знижених температурах (200 -300 °C) осаджувані шари мали менший блиск із-за розвиненого рель'єфу поверхні і розсіювали випромінювання дифузно. При підвищеній температурі (500 - 700 °C) формувалися шари мутні, молочного кольору. Залежно від умов осадження мікроструктура плівок змінювалася від аморфної до полікристалічної. При оптимальних режимах (400 - 450 °C) формувалися суцільні, механічно міцні плівки із дзеркальною світловідбивною поверхнею.

Істотно впливає на електрофізичні характеристики ФП склад шару ІТО, особливо вміст  $\text{SnO}_2$ . Осадження ІТО шару проводилося на кремнієву епітаксійну структуру  $nn^+$  типу. Контроль його параметрів проводився за виміром поверхневого електричного опору. Проведені дослідження його залежності від

змісту  $\text{SnO}_2$  в шарі ІТО, значення величини  $R_s$  від складу шару ІТО представлені на рис. 2. Встановлено, що найменшу величину електричного опору мали зразки з шаром, що складається з чистого  $\text{In}_2\text{O}_3$  без додавання  $\text{SnO}_2$ . Зі збільшенням змісту  $\text{SnO}_2$  в ІТО величина  $R_s$  зростає аж до значень 1300 Ом/квдрат для шару ІТО, що складається з 100%  $\text{SnO}_2$ .

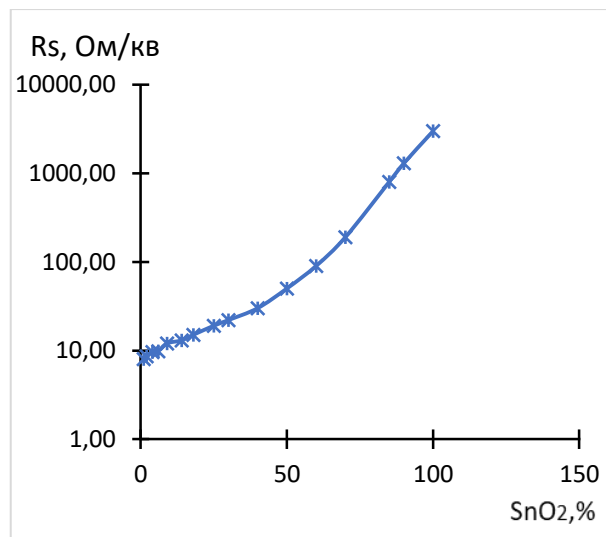


Рисунок 2 – Залежність поверхневого опору від складу шару ІТО

**ВИСНОВКИ.** Показано що сонячна енергія є ключовим чинником розвитку енергетичної галузі з виробництва фотоелектричних перетворювачів, а також зростаючим інтересом до виробів фотовольтаїки для космонавтики, телекомунікацій та побутових джерел живлення.

Встановлено, що основні зусилля дослідників зосереджено на підвищенні ефективності фотоелектричного перетворення, зниженні вартості матеріалів і виробництва, підвищенні надійності приладів, на впровадженні нових нанотехнологій разом з моно- і полікристалічними технологіями.

Представлена концепція розвитку технології ІТО/ $n$ -Si/ $n^+$ Si структур дозволяє встановити причини, що визначають характер електропровідності шару ІТО залежно від змісту в ньому  $\text{SnO}_2$ , а також їх вплив на якість фотоелектричних перетворювачів на їх основі. При невеликих концентраціях  $\text{SnO}_2$  в суміші  $\text{In}_2\text{O}_3 + \text{SnO}_2$  атоми індію замінюються атомами олова. В результаті в кристалічній ґратці діоксиду індію олово виступає донором. При більш високих концентраціях  $\text{SnO}_2$  створюються умови для утворення комплексів нейтральних молекул  $\text{SnO}_2$ . Атоми Sn при малих концентраціях утворюють донорні рівні, а при великих концентраціях утворюють нейтральні комплекси. Це і призводить до зниження електропровідності. Найбільшу електропровідність мають шари ІТО, що містять близько  $7,7 \cdot 10^{-4}$  г/моль  $\text{SnO}_2$ .

Застосування нанотехнологій у виробництві ФП відкриває можливості збільшення ефективності пе-

ретворення сонячної енергії в електричну і суттєвого зменшення витрати напівпровідникового матеріалу.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Yimai Liang, Na Guo, Linlin Li, Ruiqing Li, Guijuan Ji, Shucan Gan. Fabrication of porous 3D flower-like Ag/ZnO heterostructure composites with enhanced photocatalytic performance. *Applied Surface Science*, 2015, 332, 32-39, IF 2.538
2. Wenjun Wang et al. Hydrothermal synthesis of C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BiOIO<sub>3</sub> heterostructures with enhanced photocatalytic properties. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2015, 442, 97-102, IF 3.55
3. Bilal Masood Pirzada et al. Synthesis, characterization and optimization of photocatalytic activity of TiO<sub>2</sub>/ZrO<sub>2</sub> nanocomposite heterostructures. *Materials Science and Engineering B*, 2015, 193, 137-145, IF 2.122
4. R. Loganathan et al. Studies on dislocation and surface morphology of Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/GaN heterostructures grown by MOCVD. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, 616, 363-371, IF 2.726
5. Subhash Chand, Rajender Kumar. Electrical characterization of Ni/n-ZnO/p-Si/Al heterostructure fabricated by pulsed laser deposition technique. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, 613, 395-400, IF 2.726
6. B.C. Luo et al. Synthesis and transport properties of Ca<sub>3</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub>/ZnO heterostructure. *Materials Letters*, 2014, 120, 133-135, IF 2.269
7. S. Upadhyay et al. Effects of high energy proton implantation on the optical and electrical properties of In(Ga)as/GaAs QD heterostructures with variations in the capping layer. *Journal of Luminescence*, 2015, 161, 129-134, IF 2.367
8. Hong-Jian Feng et al. Enhanced optical properties and the origin of carrier transport in BiFeO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> heterostructures with 1090 domain walls. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 628, 311-316, IF 2.726
9. Andriy V. Kozyskiy et al. Photochemical formation and photoelectrochemical properties of TiO<sub>2</sub>/Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub> heterostructures. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 2015, in press, IF 2.291
10. Xiuzhen Zheng et al. Construction of ZnO/TiO<sub>2</sub> photonic crystal heterostructures for enhanced photocatalytic properties. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2015, 168, 408-415, IF 6.007
11. Yanqin Wang et al. Preparation and characterization of Ag<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>/BiOI heterostructure photocatalyst with highly visible-light-induced photocatalytic properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 632, 445-449, IF 2

### THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL FACTORS ON PHOTOCONVERTERS' ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS

A. Nikonova, O. Nebesniuk, Z. Nikonova

Engineering Educational and Scientific Institute of Zaporizhia National University

ORCID: 0000-0002-5714-7543; 0000-0003-4839-0258; 0000-0001-7944-5974

**Purpose.** Solar energy represents a sensible use alternative of thermal, chemical and nuclear current sources. Solar radiation can satisfy the growing needs of humanity with its energetic resources. Nowadays the actual problem is the development and production, of high-effective and economical photo converters (PC). Thus we need new technologies and materials. Semiconductor PC allows producing solar energy converting in electric with the help of homo-or heterojunctions. About 91 % of falling luminous flux energy is converted into electrical current through the charge carriers release out of semiconductor's volume. The base of their quality raise is getting high-effective silicon nanostructures, their using will raise considerably PC efficiency. Due to their high efficiency, temperature stability, and low sensitivity to radiation exposure, heterostructure-based photoconverters are the most promising for the use. **Methodology.** In the article the technology of PC production on the base of silicon structures with heterojunctions ITO/n-Si/n<sup>+</sup>-Si is proposed. Getting of these layers with the pulverization method on the surface of silicon plates is based on the results of the heating temperature optimal values determination, deposition speed and ITO layer thickness, outflow speed of the gas stream from the spray nozzle, concentration of InCl<sub>3</sub> to SnCl<sub>4</sub> in spirit and other factors. **Results.** The represented conception of technology development ITO/n-Si/n<sup>+</sup>-Si junctions helped to define reasons that determine the character of ITO layer conductivity, depending on SnO<sub>2</sub> content in it and their influence on the quality of photoelectrical converters on their base. **Originality.** The technological peculiarities of getting these layers with pulverization method, operational reliability and efficiency are revealed. **Practical value.** These tasks solution will lead to the modern technological processes modelling, to the raising of PC quality and, in the case of its consumer properties maintaining, to the use of modern supplies of silicon production and semiconductive materials. References 11, figures 2.

**Key words:** technology, photoelectric, converters, silicon structures, heterojunctions, parameters, characteristics.

## REFERENCES

1. Yimai Liang, Na Guo, Linlin Li, Ruiqing Li, Guijuan Ji, Shucai Gan. Fabrication of porous 3D flower-like Ag/ZnO heterostructure composites with enhanced photocatalytic performance. *Applied Surface Science*, 2015, 332, 32-39, IF 2.538
2. Wenjun Wang et al. Hydrothermal synthesis of C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BiOIO<sub>3</sub> heterostructures with enhanced photocatalytic properties. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2015, 442, 97-102, IF 3.55
3. Bilal Masood Pirzada et al. Synthesis, characterization and optimization of photocatalytic activity of TiO<sub>2</sub>/ZrO<sub>2</sub> nanocomposite heterostructures. *Materials Science and Engineering B*, 2015, 193, 137-145, IF 2.122
4. R. Loganathan et al. Studies on dislocation and surface morphology of Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/GaN heterostructures grown by MOCVD. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, 616, 363-371, IF 2.726
5. Subhash Chand, Rajender Kumar. Electrical characterization of Ni/n-ZnO/p-Si/Al heterostructure fabricated by pulsed laser deposition technique. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, 613, 395-400, IF 2.726
6. B.C. Luo et al. Synthesis and transport properties of Ca<sub>3</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub>/ZnO heterostructure. *Materials Letters*, 2014, 120, 133-135, IF 2.269
7. S. Upadhyay et al. Effects of high energy proton implantation on the optical and electrical properties of In(Ga)As/GaAs QD heterostructures with variations in the capping layer. *Journal of Luminescence*, 2015, 161, 129-134, IF 2.367
8. Hong-Jian Feng et al. Enhanced optical properties and the origin of carrier transport in BiFeO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> heterostructures with 1090 domain walls. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 628, 311-316, IF 2.726
9. Andriy V. Kozyskiy et al. Photochemical formation and photoelectrochemical properties of TiO<sub>2</sub>/Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub> heterostructures. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 2015, in press, IF 2.291
10. Xiuzhen Zheng et al. Construction of ZnO/TiO<sub>2</sub> photonic crystal heterostructures for enhanced photocatalytic properties. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2015, 168, 408-415, IF 6.007
11. Yanqin Wang et al. Preparation and characterization of Ag<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>/BiOI heterostructure photocatalyst with highly visible-light-induced photocatalytic properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 632, 445-449, IF 2

Стаття надійшла 02.06.2021.