

Д.М. Фреїк<sup>1</sup>, В.М. Чобанюк<sup>1</sup>, М.О. Галушак<sup>2</sup>, О.С. Криницький<sup>2</sup>, Г.Д. Матеїк<sup>2</sup>  
**Фотоелектричні перетворювачі сонячного випромінювання.  
Досягнення, сучасний стан і тенденції розвитку  
(огляд)**

<sup>1</sup>Фізико-хімічний інститут Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника,  
буль. Шевченка, 57, Івано-Франківськ, 76018, Україна, E-mail: [fcss@pu.if.ua](mailto:fcss@pu.if.ua)

<sup>2</sup>Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вуль. Карпатська, 15,  
Івано-Франківськ, 76001, Україна

Зроблено аналіз досягнень у галузі фотоелектричного перетворення сонячної енергії в електричну. Основна увага звернена на принципи роботи фотоперетворювачів на монокристалічному і аморфному кремнію, наноструктурах.

**Ключові слова:** сонячна енергетика, технологічні аспекти формування, структура, фотоперетворювачі, кремній, наноструктури.

Стаття постуила до редакції 11.11.2011; прийнята до друку 15.12.2011.

## Зміст

### Вступ

#### I. Де що з історії фотовольтаїчної енергетики

#### II. Основні принципи роботи сонячних елементів

#### III. Фотоперетворювачі на основі кремнію

##### 3.1 Кристалічний кремній

##### 3.2 Аморфний гідрований кремній

##### 3.3 Наноструктури на основі кремнію

#### VI. Сонячні елементи нового покоління

##### 4.1 Каскадні сонячні елементи

##### 4.2 Елементи із концентрованим сонячним випромінюванням

##### 4.3 Сонячні елементи на основі сенсibiliзованих барвниками напівпровідників

### Висновки

### Література

## Вступ

У зв'язку зі зміною клімату, скороченням вуглеводневої сировини, фінансовою й енергетичною кризою різко зріс інтерес до джерел поновлюваної енергії. Сонячні електростанції – це перспективний напрямок розвитку енергетики в ХХІ-му столітті. Прагнення позбутися енергетичної залежності в Європейському Союзі вилилося у розроблений найбільший інвестиційний проект (DESERTEC) вартістю \$ 555 мільярдів. Проект передбачає будівництво 100 великих сонячних електростанцій в пустелі Сахара. Якщо він здійсниться, то генерованої енергії буде достатньо для задоволення 15 - 25% потреб як Європи, так і всіх країн Північної Африки.

Створений консорціум з найбільших компаній і банків Європи з фінансування цього грандіозного будівництва на основі параболічних концентраторів сонячного випромінювання для нагрівання теплоносія (масла) до параметрів, придатних до використання в турбо-генераторах (термоэффект).

Джерелом енергії сонячного випромінювання служить термоядерна реакція - кожену секунду на Сонці  $\sim 6 \cdot 10^{11}$  кг водню перетворюється в гелій. Дефект маси при цьому становить 4000 кг, що згідно із співвідношенням Ейнштейна  $E = mc^2$  призводить до виділення  $4 \cdot 10^{20}$  Дж енергії. Основна частина цієї енергії витрачається у вигляді електромагнітного випромінювання в діапазоні 0,2-3 мкм. Оскільки повна маса Сонця  $\sim 2 \cdot 10^{30}$  кг, воно може перебувати в

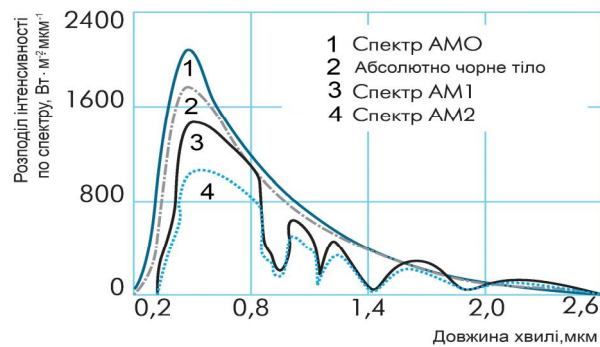


Рис. 1. Розподіл інтенсивності у спектрі сонячного випромінювання[1].

достить стабільному стані понад 10 млрд. років з постійним виділенням енергії.

Інтенсивність сонячного випромінювання у вільному просторі на відстані, рівному середній відстані між Землею і Сонцем, називається сонячною сталою. Її величина - 1353 Вт/м<sup>2</sup>. При проходженні через атмосферу сонячне світло послаблюється в основному через поглинання інфрачервоного випромінювання парами води, ультрафіолетового випромінювання - озоном і розсіювання випромінювання частинками атмосферного пилу і аерозолями. Показник атмосферного впливу на інтенсивність сонячного випромінювання, що доходить до земної поверхні, називається "повітряної масою" (AM). AM визначається як секанс кута між Сонцем і зенітом. На рис.1 показано спектральний розподіл інтенсивності сонячного випромінювання в різних умовах. Верхня крива (AM0) відповідає сонячному спектру за межами земної атмосфери (наприклад, на борту космічного корабля), тобто при нульовій повітряній масі. Вона апроксимується розподілом інтенсивності випромінювання абсолютно чорного тіла при температурі 5800К. Криві AM1 і AM2 ілюструють спектральний розподіл сонячного випромінювання на поверхні Землі, коли Сонце в зеніті і при куті між Сонцем і зенітом 60<sup>0</sup>, відповідно. При цьому повна потужність випромінювання - відповідно порядку 925 і 691

Вт/м<sup>2</sup>. Середня інтенсивність випромінювання на Землі приблизно збігається з інтенсивністю випромінювання при AM = 1,5 (Сонце - під кутом 45<sup>0</sup> до горизонту) [1]. Таким чином, при використанні високоєфективних методів перетворення енергії Сонце може забезпечувати бурхливо зростаючі потреби в ній практично вічно. Такий прогноз робить обгрунтованими великі фінансові затрати на створення широкомасштабних сонячних електростанцій.

Один із основних напрямів прямого перетворення сонячної енергії в електричну реалізується у напівпровідникових фотоелементах (ФЕ). До теперішнього часу виробництво більшості комерційних модулів сонячних елементів засноване на кристалічному Si з ефективністю  $\eta \leq 20\%$  (I покоління ФЕ) і аморфних тонкоплівкових SE з великою площею ФЕ з величиною  $\eta \sim 5 - 8\%$  (II-покоління ФЕ). Концепція III-покоління - це використання нано- та мікродотів (мікродотів). ФЕ з мікродотами (Vapor-Liquid-Solid - VLS-метод) відносяться до класу пристроїв з особливим конструктивним виконанням для отримання спрямованого транспорту носіїв заряду (НЗ) за рахунок геометрії і матеріалу таких структур.

Основні втрати сонячного випромінювання при трансформації його в електричну енергію визначаються фундаментальними обмеженнями

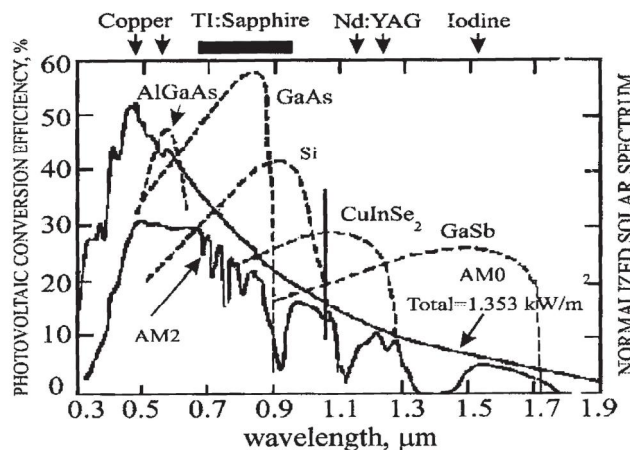


Рис. 2. Залежність ефективності різних фотоелементів від довжини хвилі сонячного випромінювання. AM0 і AM2 - спектральні характеристики сонячного випромінювання при різних атмосферних умовах [3].

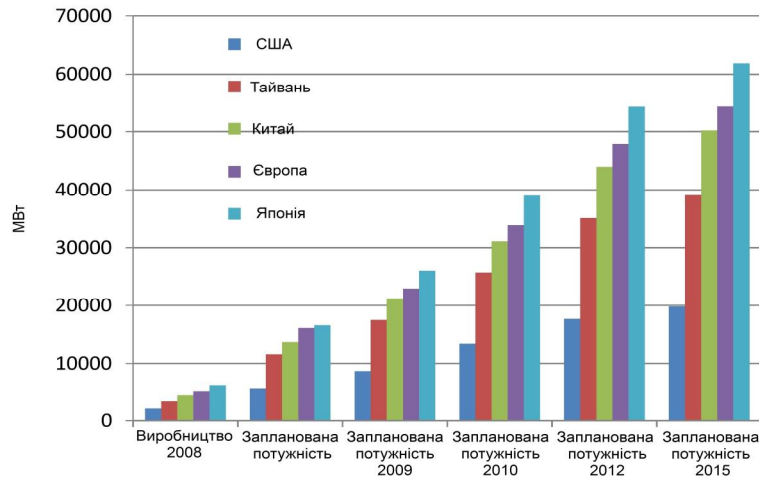


Рис. 3. Заплановане кумулятивне зростання сонячної фотоенергетики в світі до 2015 року [6].

фотоефекту в області інфрачервоного-випромінювання ( $h\nu \leq E_g$ ) і в області короткохвильового випромінювання ( $h\nu \gg E_g$ ), а також низькою ефективністю виведення фотогенерованих носіїв заряду з об'єму (c-Si)-фотоперетворювача (рис. 2) [2]

Сонячні батареї (СБ) знайшли застосування в космонавтиці, де займають домінуюче положення серед інших джерел автономного енергоживлення. СБ постачають електроенергію апаратурі супутників і системи життєзабезпечення космічних кораблів і станцій, а також заряджають електрохімічні акумулятори, використовувані на тінювих ділянках орбіти [4]. Зростання вимог до бортових систем космічних апаратів призводить до необхідності створення сонячних батарей, що володіють більш високими енергетичними й експлуатаційними характеристиками. Основні з них – підвищення КПД, збільшення ресурсу їх експлуатації до 15 років на геостационарних орбітах в умовах підвищеної радіації й можливості їх функціонування при високій концентрації сонячного випромінювання. У космічних системах до 80% застосовуються фотоперетворювачі з монокристалічного кремнію, а 20% – з GaAs-структур.

Для виготовлення наземних фотоелектричних перетворювачів (ФЕП) найбільш придатними вважаються напівпровідники Si, CdTe, GaAs, InP. Близько 91% енергії падаючого світлового потоку можна перетворювати в електричний струм у кремнієвих ФЕП при розв'язанні проблеми вивільнення носіїв заряду (НЗ) із об'єму напівпровідника. Низька вартість кремнію є визначальною при виборі матеріалу для фотоелементів.

Відповідно з дорожньою картою [5] Міжнародного Енергетичного Агентства, сукупна потужність сонячних фотоелектричних установок в світі до 2020 р. досягне 200 ГВт, до 2030 р. - 900 ГВт, до 2040 р. - 2000 ГВт, і складе 3000 ГВт до 2050 р., що відповідатиме 25% глобальної потужності

електричної енергії на планеті. 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 з зростаючим темпом. 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 ФЕП 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. чоловік) проживає в регіонах з високим рівнем сонячної радіації.

На рис. 3 представлено заплановане до 2015 р. зростання потужностей сонячної фотоенергетики в світі [6]. Очікується, що протягом найближчих 20 років сонячна фотоенергетика створить більше 2 млн. робочих місць, скоротить викиди парникових газів в атмосферу на 350 млн. тонн CO<sub>2</sub>, що еквівалентно зупинці 150 вугільних електростанцій.

## I. Дещо з історії фотовольтаїчної енергетики

Уперше фотовольтаїчний ефект спостерігався в електролітичній комірниці Едмондом Беккерелем в 1839 р. Перші експерименти із твердотільними фотоелектричними елементами на основі селену

проводилися Адамсом і Деєм у Лондоні в 1876 р. [7]. Більш як півстоліття знадобилося для того, щоб з'явилися перші сонячні фотоелементи з ефективністю, ледь не перевищуючою 1%. Однак для старту фотоелектричної енергетики була потрібна суттєво більша ефективність. Вирішальним для цього напрямку з'явилося створення кремнієвих фотоелементів з р-п-переходом, що мали КПД близько 6% [9]. Перше практичне використання кремнієвих сонячних батарей для енергетичних цілей мало місце не на Землі, а в навколосемному космічному просторі. В 1958 р. були запущені штучні супутники Землі, оснащені такими батареями — радянський „Супутник-3“ і американський „Авангард-1“.

Слід зазначити, що науковою базою для створення перших сонячних батарей стала розробка теорії й технології напівпровідникових матеріалів і структур з р-п-переходом. Основні області застосування приладів на напівпровідникових матеріалах у той час бачилися в техніці перетворення електричної енергії (перетворення змінного струму в постійний, височастотна генерація, перемикання і т.д.) і в електронних обладнаннях передачі й обробки інформації (радіо, зв'язок і т.д.). Додатково до „класичних“ напівпровідникових матеріалів — германію й кремнію, з 1950 р. почався синтез матеріалів типу АШВВ. На початку 1960-х років були створені й перші сонячні фотоелементи з р-п-переходом на основі арсеніду галію. Уступаючи в ефективності кремнієвим фотоелементам, арсенід-галієві проте були здатні працювати навіть при значному нагріванні. Перше практичне застосування вдосконалених арсенід-галієвих сонячних батарей для енергетичних цілей було ще більш екзотичним, чим у випадку кремнієвих батарей. Вони забезпечували електропостачання радянських космічних апаратів, що працюють на околицях планети Венера (1965р.), а також самохідних апаратів „Луноход-1“ і „Луноход-2“, що досліджували поверхню Місяця (1970 і 1972 рр.).

Темпи зростання фотоелектричної енергетики, починаючи з 1990 р., перевищили 10% і постійно збільшуються протягом останніх років. Уже в 1997 р. фотоелектрична енергетика за темпами зростання випередила вітрову. На кінець 2000 р. встановлена потужність фотоелектричних установок в світі оцінювалася в 750 МВт [10] з річним приростом 100 - 120 МВт. У 2010 р. ця цифра сягнула 14.0 ГВт, а до 2020 р. має зрости до 200 ГВт, і до 2030 р. до 1830 ГВт. [11,12]

## II. Основні принципи роботи сонячних елементів

Найпростіша конструкція сонячного елемента (СЕ) - приладу для перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну - показана на рис. 4. На малій глибині від поверхні кремнієвої пластини р сформований р-п-перехід з тонким металевим

контактом. На тильну сторону пластини нанесено суцільний металевий контакт. Коли СЕ освітлюється, поглинені фотони генерують нерівноважні електрон-діркові пари. Електрони, що генеруються в р-шарі поблизу р-п-переходу, підходять до р-п-переходу і

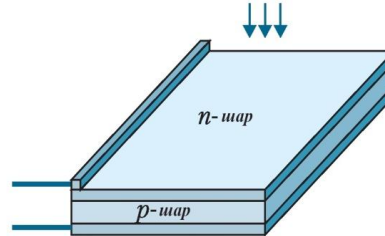


Рис. 4. Конструкція сонячного елемента[1].

існуючим в ньому електричним полем виносяться в п-область. Аналогічно і надлишкові дірки, створені в п-шарі, частково переносяться в р-шар (рис. 5а). У результаті п-шар набуває додаткового негативного

На малій глибині від поверхні кремнієвої пластини р-типу сформований р-п-перехід з тонким металевим контактом. На тильну сторону пластини нанесено суцільний металевий контакт. Коли СЕ освітлюється, поглинені фотони генерують нерівноважні електрон-діркові пари. Електрони, що генеруються в р-шарі поблизу р-п-переходу, підходять до р-п-переходу і існуючим в ньому електричним полем виносяться в п-область. Аналогічно і надлишкові дірки, створені в п-шарі, частково переносяться в р-шар (рис. 5а). У результаті п-шар набуває додаткового негативного заряду, а р-шар - позитивний. Знижується первісна контактна різниця потенціалів між р-і п-шарами напівпровідника, і в зовнішньому ланцюзі з'являється напруга (рис. 5б). Негативному полюсу джерела струму відповідає п-шар, а р-шару - позитивному.

Величина становленої фото - ЕРС при освітленні переходу випромінюванням постійної інтенсивності описується рівнянням вольт-амперної характеристики (ВАХ)

$$U = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_{ph} - I}{I_s} + 1, \quad (1)$$

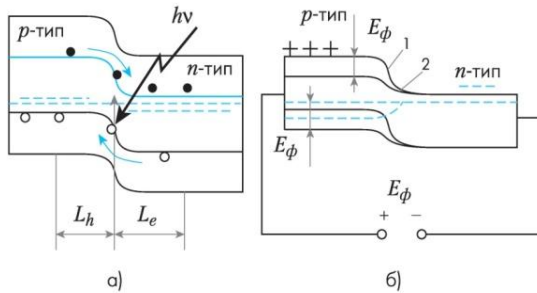
де I-загальний струм, I<sub>s</sub>-струм насичення, а I<sub>ph</sub> – фотострум, k-стала Больцмана, T-абсолютна температура, q-заряд електрона.

Для ефективної роботи сонячних елементів необхідне дотримання ряду умов:

- оптичний коефіцієнт поглинання активного шару напівпровідника повинен бути достатньо великим, щоб забезпечити поглинання значної частини енергії сонячного світла в межах товщини шару;
- генеруються при освітленні електрони і дірки мають ефективно збиратися на контактних електродах з обох сторін активного шару;
- сонячний елемент повинен володіти значною висотою бар'єру в напівпровідниковому переході;

- повний опір, включений послідовно з сонячним елементом (виключаючи опір навантаження), повинен бути малим для того, щоб зменшити втрати потужності (тепло Джоуля) в процесі роботи;

- структура тонкої плівки повинна бути однорідною по всій активній області сонячного елемента, щоб виключити закорочування і вплив



**Рис. 5.** Зонна модель розімкнутого p-n-переходу: а) - в початковий момент освітлення; б) - зміна зонної моделі під дією постійного освітлення і виникнення фото ЕРС [1].

шунтуючих опорів на характеристики елемента.

Виробництво структур на основі монокристалічного кремнію, що задовольняють даним вимогам, - процес технологічно складний і дорогий. Тому увага була звернена на такі матеріали, як сплави на основі аморфного кремнію (a-Si: H), арсенід галію і полікристалічні напівпровідники.

СЕ можна класифікувати по інтенсивності збирання світла, по хімічному складу, товщині й кристалічній структурі шарів, кількості сполучених на одній підкладці елементів і т.д.

По інтенсивності збирання світла сонячні елементи розділяються на одиничні й концентраційні. Одиничні СЕ не мають спеціального обладнання для збирання світла й поглинають тільки ту кількість світлового потоку, яка падає на займану ними площу поверхні. Концентраційні сонячні елементи мають спеціальне світлове обладнання, що концентрує (лінзи або дзеркала), які дозволяють збільшувати щільність світлового потоку на поверхні елементів у кілька раз. Як правило, концентраційні елементи виготовляються з дорогих світлопоглинаючих матеріалів з найкращими показниками фотовольтаїчного перетворення світла. У позначенні таких сонячних елементів обов'язково вказується коефіцієнт збирання світла, вимірюваний у сонцях (suns). Коефіцієнт збирання показує, у скільки раз збільшиться щільність потоку падаючого на СМ випромінювання після його оптичного збирання системами, що концентрують.

За кристалічним складом поглинаючого матеріалу СМ підрозділяються на монокристалічні, мультикристалічні, полікристалічні, мікрокристалічні, нанокристалічні. Монокристалічні сонячні елементи являють собою сонячні елементи з поглиначем у вигляді цільного кристала напівпровідникової речовини. Мульти-, полі-, мікро- і нанокристалічні СЕ мають у якості поглинаючої

речовини суміш напівпровідникових кристалітів з різною орієнтацією, структурою й формою, розмір яких і визначає тип сонячного елемента при розмірах кристалітів від 1 до 100 мм речовину називають мультикристалічною, від 1 до 1000 мкм – полікристалічною, менш 1 мкм – мікрокристалічною, менш 1 нм – нанокристалічною [13,14,15].

Залежно від товщини світлопоглинаючого матеріалу сонячні елементи підрозділяються на тонкоплівкові й товстоплівкові. Тонкоплівкові сонячні елементи мають товщину в декілька мкм, товстоплівкові – у десятки або сотні мкм.

Залежно від складу поглинаючого матеріалу сонячні елементи підрозділяються на кремнієві, на основі АПВV напівпровідників, на основі АПВVI (в основному CdTe), на основі АІВІСВІ2 напівпровідників і змішані. Як правило, для зручності конструкції й підвищення КПД СМ прагнуть добитися поглинання світла в одному з його шарів. Цей шар називають поглинаючим (поглиначем). Другий напівпровідник служить лише для створення потенційного бар'єра й збирання генерованих світлом носіїв заряду[16].

### III. Фотоперетворювачі на основі кремнію

**4.1 Кристалічний кремній.** Монокристалічні кремнієві сонячні елементи (c-Si SE) виготовляють з кремнієвих пластин 0.3 мм (300 мкм) товщини шляхом легування їх відповідно донорними й акцепторними домішками, створення омичних контактів. Існують кілька типів конструкції монокристалічних сонячних елементів, що відрізняються способом формування, структурою й розташуванням контактів (рис 6) [17,16].

Основний недолік монокристалічних кремнієвих сонячних елементів – велика витрата порівняно дорогого високоякісного кремнію, більша частина якого відіграє роль пасивної підкладки. Слід зазначити, що технологія виробництва сонячних елементів на кристалічному кремнії перебуває в майже ідеальному стані й досить складно знайти шляхи покращення вже існуючих технологічних процесів, відпрацьованих у протягом багатьох років у рамках виробництва мікроелектронних обладнань. Крім того, досить добре розроблена теорія фотогальванічних перетворень у монокристалі й на її основі створені комп'ютерні програми оптимізації параметрів монокристалічних сонячних елементів на основі кремнію [17]. Єдиний шлях оптимізації c-Si СМ – це здешевлення вихідної сировини. Для зменшення собівартості кремнієвих сонячних елементів досліджується можливість використання як поглиначів полі- і мультикристалічного кремнію.

**4.2 Аморфний гідрований кремній.** Аморфні сонячні елементи використовують як поглинаючий шар аморфні речовини, що володіють тільки близькою впорядкованістю структури. Ідеальним аморфним матеріалом для використання як поглиначів є a-Si

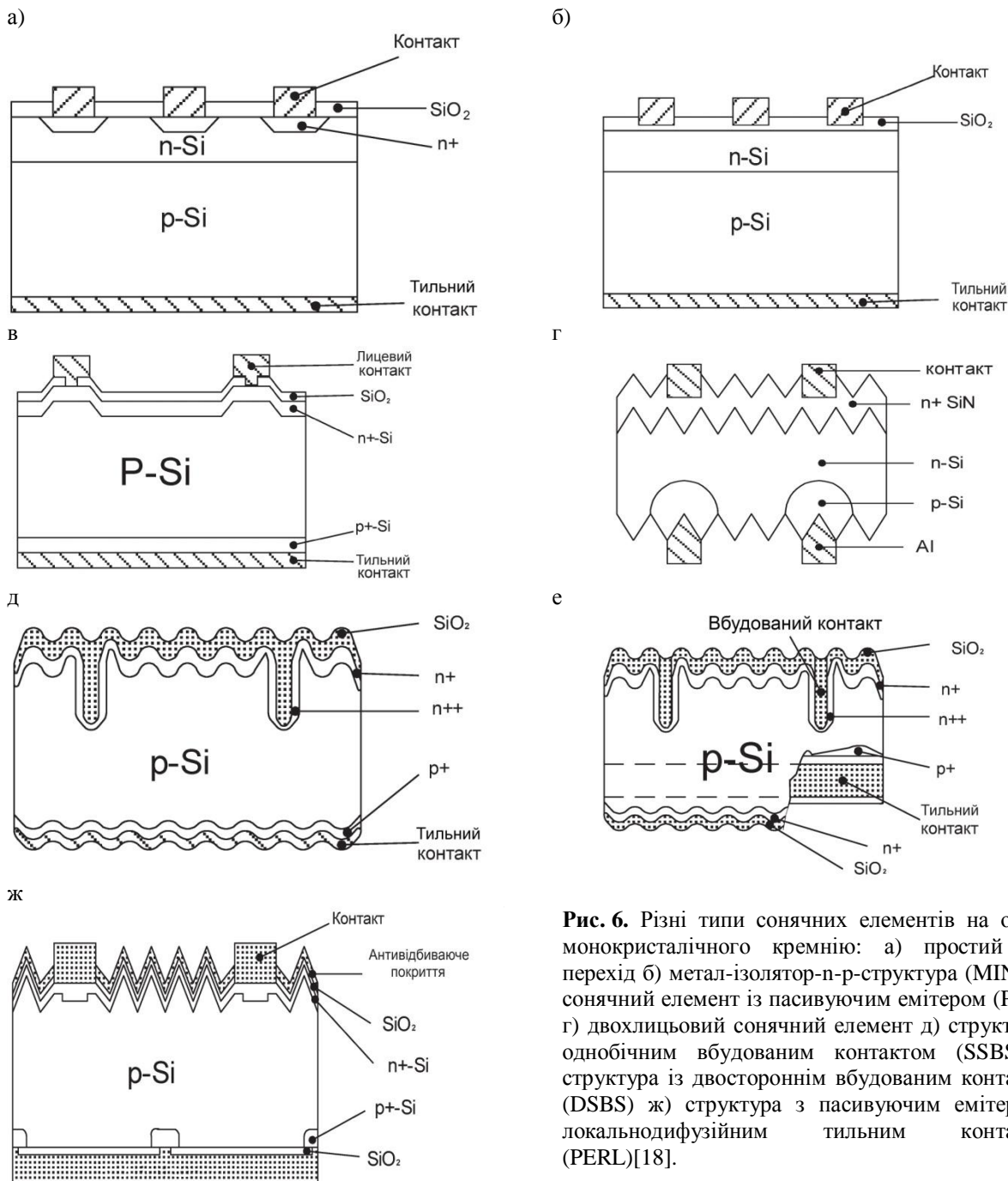
(аморфний кремній). Значення його забороненої зона може бути змінено шляхом введення домішки водню (гідрогенізації). Аморфний кремній, легований воднем (a-Si:H), є основою аморфних сонячних елементів. Іноді крім водню в поглинаючому аморфному шарі використовуються також домішки германію (a-SiGe:H).

У якості робочого переходу для a-Si СМ можуть використовуватися бар'єр Шоттки, МОП-структура, p-i-n-структура (рис.7).

Фотоелектронні властивості найбільш виражені в гідрованому аморфному кремнії (a-Si:H) і мікрокристалічна (μc-Si:H) і визначаються щільністю розірваних атомних зв'язків. Наявність водню призводить до пасивації електрично активних

глибоких рівнів по межах зерен і перехідних областей (interfaces) між аморфною і кристалічною фазами в (a-Si)-структурах і асоціюється з концентрацією розірваних спінових зв'язків. Водень для стабілізації структури повинен проникати на всю глибину впровадження суміші в матрицю кристала і перебувати в моногібридному з'єднанні Si-H, оскільки ця конфігурація найбільш стабільна. При отриманні μc-Si:H наявність водню повинне привести до фіксованої геометрії наноструктур з обмеженими розмірами кристалітів. Це забезпечить збереження їх навіть при збільшених температурах відпалу.

Міграція водню в гідрогенізованому аморфному кремнії визначається енергією активації в області 0,5 - 2,7 еВ. Така велика невизначеність викликана

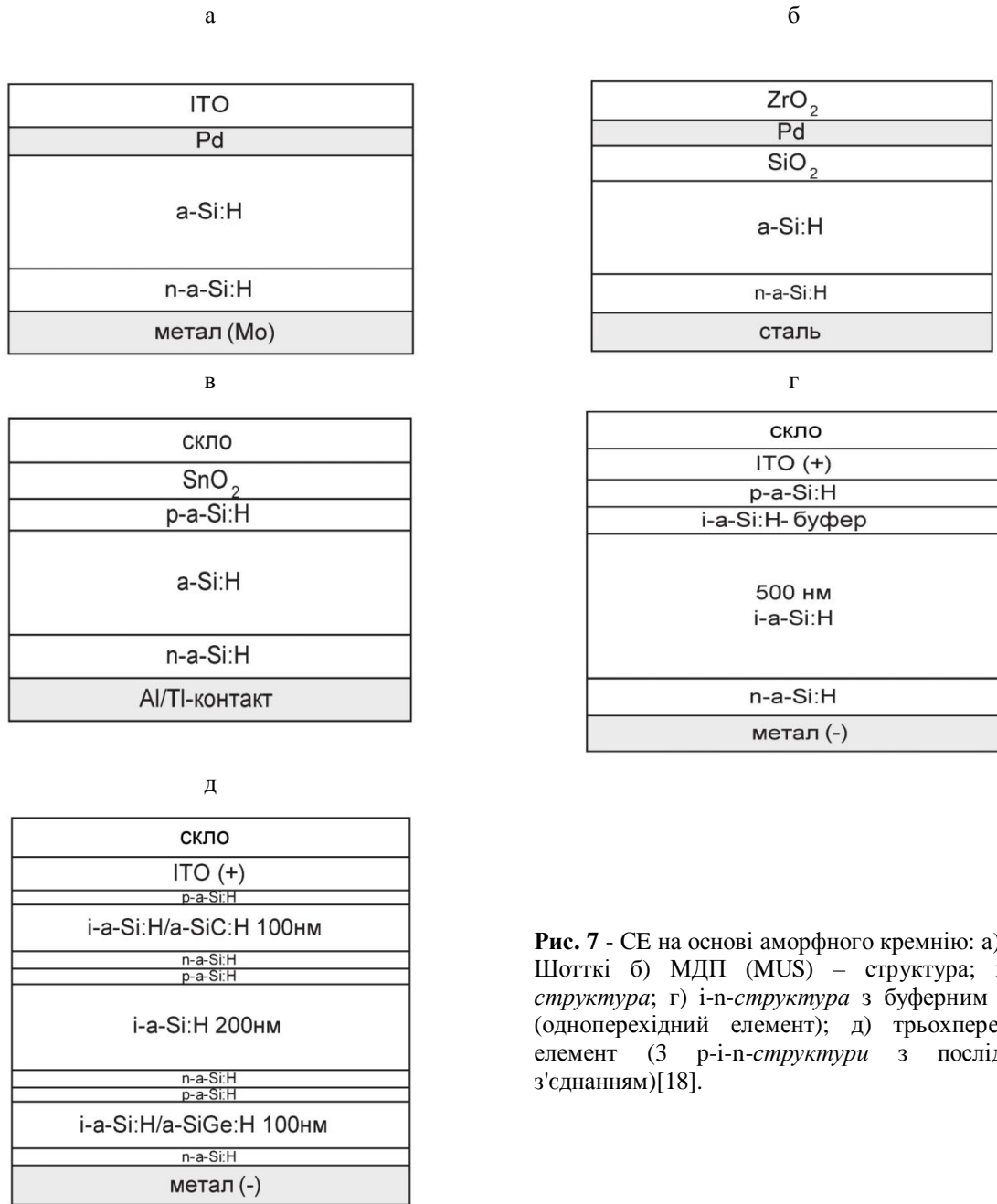


б)

г)

е)

**Рис. 6.** Різні типи сонячних елементів на основі монокристалічного кремнію: а) простий p-n-перехід б) метал-ізолятор-n-p-структура (MINP) в) сонячний елемент із пасивуючим емітером (PESC) г) двошліфований сонячний елемент д) структура з одностороннім вбудованим контактом (SSBS) е) структура із двостороннім вбудованим контактом (DSBS) ж) структура з пасивуючим емітером і локально-дифузійним тильним контактом (PERL)[18].



**Рис. 7** - СЕ на основі аморфного кремнію: а) бар'єр Шотткі б) МДП (MUS) – структура; в) і-п-структура; г) і-п-структура з буферним шаром (одноперехідний елемент); д) трьохперехідний елемент (3 р-і-п-структури з послідовним з'єднанням)[18].

сильною залежністю рухливості  $H$  від концентрації  $C_H$ . Водень може дифундувати через дрібні пастки, а захоплюватися розірваними зв'язками (глибокі пастки). При  $C_H \sim C_d$  ( $C_d$  - концентрація дефектів) водень мігрує після термічного вивільнення з глибоких пасток. При  $C_H \gg C_d$  з типовою  $H$  концентрацією  $\sim 10^{21} \text{ см}^{-3}$  глибокі пастки заповнені, надлишковий водень може мігрувати через дрібні пастки з малою енергією активації і розташовуватися в середині метастабільної конфігурації  $\text{Si-H-Si}$  [20]. Оптична ширина забороненої зони  $\mu\text{-Si:H}$  залежить від концентрації пов'язаних атомів водню так само, як і в (а-Si:H)-структурах. Різниця в їх величинах полягає в різній концентрації пов'язаних атомів водню. У звичайних плівках (а-Si:H) з підвищенням рівня легування бором оптична ширина забороненої

зони швидко зменшується, що є сильним обмеженням у використанні цього матеріалу в сонячних елементах. У той же час значення оптичної ширини забороненої зони  $\mu\text{-Si:H}$  ( $B$ ) залишаються високими у всьому діапазоні концентрацій легуючої домішки. При високих рівнях легування бором провідність плівок  $\mu\text{-Si:H}$  ( $B$ ) досягає значень  $10^{-1} \text{ См / см}$ . Це робить даний матеріал придатним для використання в сонячних елементах в якості прозорого покриття з високою провідністю [19].

У створеній структурі міститься суміш ( $\mu\text{-Si:H}$  + а-Si:H). При температурі відпалу до  $T \sim 350 - 370 \text{ }^\circ\text{C}$  зберігаються аморфна фаза і  $\mu\text{-Si:H}$  ( $B$ ) з малим розміром кристалітів. При температурі відпалу  $T \geq 370 \text{ }^\circ\text{C}$  аморфна фаза відпалюється, залишається  $\mu\text{-Si:H}$  ( $B$ ) зі збільшеним розміром кристалітів і тому

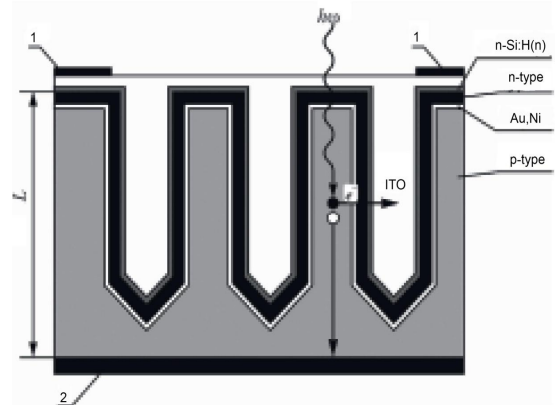
величина питомого опору,  $R_{\min}$ , підвищується. Це вказує на те, що властивості нанорозмірних структур будуть вичерпані і зразки кремнію набувають вже відомих властивостей мікроструктур. Плівки  $a\text{-Si}_1\text{-}_x\text{C}_x\text{:H}$  більш теплостійкі в порівнянні з плівками  $a\text{-Si:H}$ , оскільки зв'язок C-H більш сильніший чим зв'язок Si-H. У створених  $a\text{-Si:H}$ -структурах в  $c\text{-Si}$  (р, n)-кристалі при радіаційній обробці його ядрами  $^{238}\text{U}$  через поділ носіїв зарядів в області вигинів енергетичних зон квантових структур інтенсивна фотолюмінесценція відсутня. Для наземного виконання СЕ з високим ККД необхідно мати перетворювач короткохвильового випромінювання в довгохвильове за рахунок перевипромінювання зона-зона в  $a\text{-Si:H}$ -структурі. Вивід носіїв заряду з обсягу аморфної фази СЕ (мала рухливість НЗ) проводиться по провідних квантових структурах малої глибини або по всій глибині ниток  $\sim 300$  мкм без перетворювача УФ [20,21]. У космічному просторі при великому потоці УФ і руйнуючого впливу ефекту Стаблера-Вронського гідровані аморфні структури не можуть бути використані і вивід носіїв заряду повинен проводитися дротами, створеними на всю глибину СЕ [22].

**4.3 Наноструктури на основі кремнію СЕ з мікродротоми** (Vapor-Liquid-Solid-VLS-метод) відносяться до класу пристроїв із особливим конструктивним виконанням для одержання спрямованого транспорту носіїв заряду за рахунок геометрії й матеріалу таких структур. У тонкоплівковому СЕ аморфні шари кремнію синтезуються CVD-методом з газів  $\text{SiH}_4$ ,  $\text{H}_2$  і вирощуються на підкладці з металеві фольги. Застосовується геометрія з набору мікроструктур у вигляді дротів в коаксіальній формі з р-n-переходом.

Масиви квантових ниток у монокристалічному кремнії з малим питомим опором формуються двома радіаційними процесами – внаслідок часткового розриву міжатомних зв'язків потоком прискорених електронів і створенням довгих схованих треків у його структурі за рахунок процесів йонізації, створених багатозарядними йонами. Ступінь йонізації структури кристала визначається величиною зарядового стану йона й наявністю розірваних міжатомних зв'язків, що знижують стік заряду з об'єму напівпровідника для виникнення термічного піка й кулонівського вибуху з метою збільшення глибини утвору провідних квантових структур в об'ємі кремнієвого монокристала. Критерієм виникнення схованого треку вважається підвищення температури локальної області кристала до температури плавлення (аморфна фаза). При високих величинах виділення енергії ( $de/dx \sim Z^2$ ) [23] процеси трекоутворення, посилені попереднім дефектоутворенням, характерні кожному йону. При опроміненні кристала легкими й важкими осколками ядер  $^{238}\text{U}$  [24] з величиною заряду  $Z_L = 38,6$ ;  $Z_T = 53,4$  од. йонізація структури викликає зміну стану реагуючих дефектів. Йонізація змінює параметри дифузії домішок, що позначається на глибині їх зсуву й утворення енергетичних бар'єрів для основних НЗ. При малих флюенсах йонів безперервні треки не

формуються, а тільки дефекти й кластери через швидко епітаксiальну рекристалізацію навколо траєкторії йона. Для одержання безперервних треків необхідно підвищувати флюенс йонів для нагромадження досить великої кількості дефектів структури або робити попереднє радіаційне дефектоутворення для зриву процесу рекристалізацію областей близько траєкторії йона. Підвищення флюенса осколків проводиться за рахунок збільшення перетину фотоділення ядер урану при переході в область гігантського резонансу зі збільшенням енергії гамма-квантів.

Наявність квантових дротів дозволяє розв'язати проблему, що виникає при традиційному способі виробництва фотоелементів, яка пов'язана із

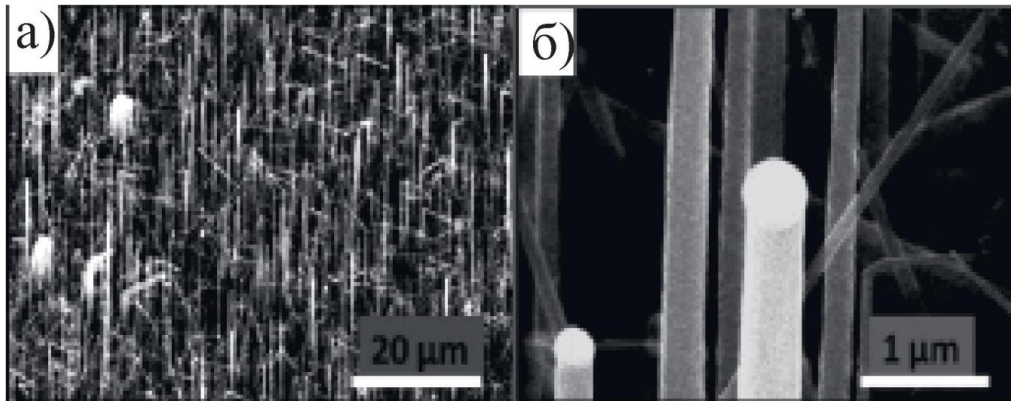


**Рис. 8.** Схема (архітектура) кремнієвого фотоперетворювача вертикальної конфігурації з мікродротоми (California Institute of Technology, USA), 1 – фронтальний контакт, 2 – тильний контакт, L – товщина комірки фотоперетворювача [3].

процесом поглинання сонячного випромінювання в структурі матеріалу й з виведенням носіїв заряду з його об'єму – фотоелемент великої товщини забезпечує повне поглинання сонячного випромінювання, в той час як тонкий фотоелемент забезпечує ефективний збір носіїв заряду. Довгі квантові нитки створюють спрямований рух носіїв заряду з об'єму кремнію, а при оптимізації товщини р-n-структур забезпечать одержання високої ефективності перетворення сонячного випромінювання в електричну енергію.

Перспективним є також метод вертикальних мультипереходів, розташованих паралельно падаючому світлу (рис. 8, рис. 9), який дозволяє неосновним НЗ досягати р-n-переходу, підвищити ефективність ФЕ й захищеність від радіаційного руйнування, що важливо для використання в космічних умовах [25]. Велика кількість вибудованих мікродротів створює можливість збільшення виведення на колектор НЗ із малою дифузійною довжиною. Діаметр мікродроту повинен становити не менш декількох сотень нанометрів, довжина її повинна становити десятки мікронів для найбільшого поглинання фотонів із сонячного спектра. Для вирощування мікродротів використовується VLS-Метод (vapor-liquid-solid) з металевими

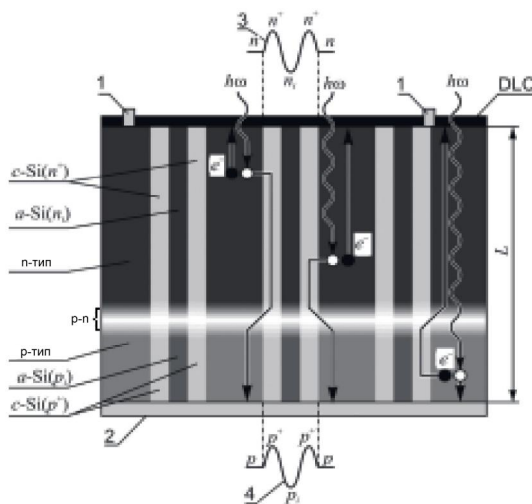




**Рис. 9.** Типовий приклад Si-мікродротів, вирощених на основі SiH<sub>4</sub>, (структури ФЕ з p-n-переходами в коаксіальному виконанні), California Institute of Technology, USA[3].

каталізаторами.

Для виведення НЗ пропонується використовувати сформовані випромінюванням провідні квантові дроти з мікро- і наноструктур. НЗ з малою рухливістю, генеровані фотонами широкого спектра сонячного випромінювання, виводяться з об'єму кремнієвого фотоперетворювача по провідним квантовим дротам (мал.10), створеними методом кулонівського вибуху. Оскільки дифузія домішок в аморфній фазі значно вища, чим у кристалічній структурі, отже, кластерні об'єднання, зміщуючись від центру схованого треку на периферію, створюють нанорозмірні нитки зі збільшеною концентрацією домішки. При зниженні рекристалізації на епітаксіальному шарі матриці область p<sup>+</sup>(n<sup>+</sup>) буде розширюватися в структуру p(n).

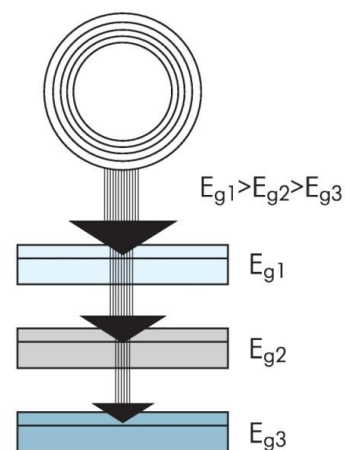


**Рис. 10.** Схема (архітектура) кремнієвого фотоперетворювача в планарному виконанні із провідними квантовими нитками (NSC KIPT, Kharkov, Ukraine), 1 – фронтальний контакт, 2 – тильний контакт, L – товщина комірки, 3, 4 – форма квантової нитки в n-і p-структурах кремнієвого фотоперетворювача[3].

## IV. Сонячні елементи нового покоління

### 5.1 Каскадні сонячні елементи

Більшість сучасних СЕ володіють одним p-n-переходом. У такому елементі вільні носії заряду створюються тільки тими фотонами, енергія яких більше або дорівнює ширині забороненої зони. Іншими словами, фотоелектричний відгук одноперехідного елемента обмежений частиною сонячного спектра, енергія якого вища ширини забороненої зони, а фотони меншою енергії не використовуються. Подолати це обмеження дозволяють багатоперехідні структури з двох і більше СЕ з різною шириною забороненої зони. Такі елементи називаються багатоперехідними, каскадними або тандемними [26, 27]. Оскільки вони працюють зі значно більшою частиною сонячного



**Рис.11.** Принцип побудови багатоперехідного сонячного елемента[1].

спектра, ефективність фотоелектричного перетворення у них вище.

У типовому багатоперехідному сонячному

елементі (рис.11) одиночні фотоелементи розташовані один за одним таким чином, що сонячне світло спочатку потрапляє на елемент з найбільшою шириною забороненої зони, при цьому поглинаються фотони з найбільшою енергією. Пропущені верхнім шаром фотони проникають в наступний елемент з меншою шириною забороненої зони і т.д.

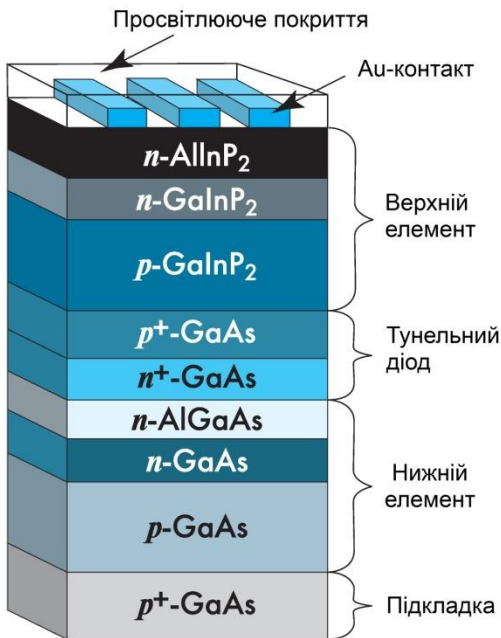


Рис.12. Каскадний елемент[1].

Основний напрямок досліджень в області каскадних елементів пов'язано з використанням арсеніду галію в якості одного або кількох компонентів. Ефективність перетворення подібних СЕ досягає 35%. Крім того в каскадних елементах широко застосовуються аморфний кремній, та сплави на його основі ( $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ ,  $a\text{-Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{:H}$ ), а також  $\text{CuInSe}_2$ .

На рис.12 зображена каскадна батарея, в якій верхнім елементом служить структура на основі GaInP с n-AlInP як вікна, далі йде тунельний діод на GaAs для проходження носіїв між елементами і

нижній елемент з GaAs.

Дуже перспективні каскадні батареї, що

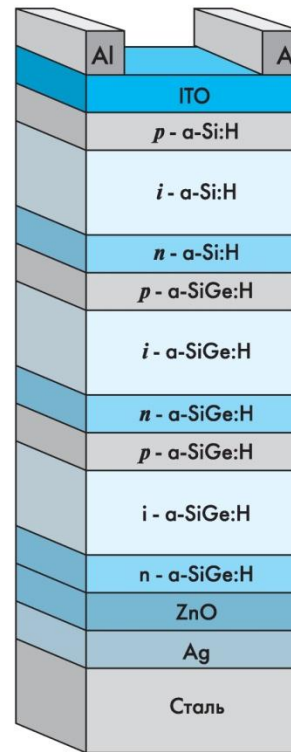


Рис. 13. Трьохкаскадний сонячний елемент на основі сплавів a-SiGe:H[1].

складаються з трьох елементів з різною шириною забороненої зони (рис. 13) [26,27]. Верхній шар, що поглинає короткохвильову область сонячного спектра, сформований із сплаву на основі a-Si:H з шириною оптичної щільності 1,8 eВ. Для середнього елемента в якості шару i-типу використаний сплав a-SiGe:H з вмістом германію ~ 10-15%. Ширина оптичної щільності даного шару (1,6 eВ) ідеальна для поглинання зеленої області сонячного спектра. Нижня частина СЕ поглинає довгохвильову частину спектра, для цього використовується шар a-SiGe:H з

Таблиця

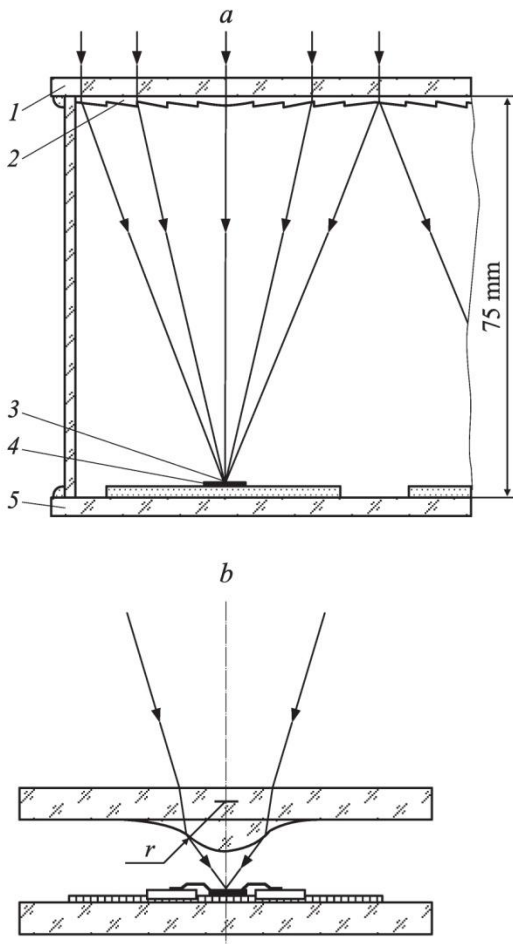
Теоретичні, очікувані та досягнуті значення ККД каскадних сонячних елементів[29,30] .

Спектр сонячного випромінювання	ккд, %					
	Значення	Кількість p-n-переходів в каскаді				
		1	2	3	4	5
В умовах навколоземного космосу (AM0)	Теоретичне	28	33	38	42	45
	Очікуване	23	28	33	36	38
	Реалізоване	21.8	27.2	29.3	—	—
У наземних умовах (AM1.5)	Теоретичне	30	36	42	47	49
	Очікуване	27	33	38	42	44
	Реалізоване [28]	25.1	30.3	31.0	—	—
У наземних умовах з концентрацією (AM1.5)	Теоретичне	35	42	48	52	54
	Очікуване	31	38	43	47	49
	Реалізоване [28]	27.6	31.1	34.0	—	—

концентрацією германію 40-50%. Не поглинене світло відбивається від заднього контакту на основі Ag/ZnO. Всі три елементи каскадної сонячної батареї пов'язані між собою сильно легованими шарами, що утворюють тунельні переходи між сусідніми елементами.

### 5.2 Елементи із концентрованим сонячним випромінюванням

До сих пір ми не розглядали ще одну можливість для збільшення ККД фотоелектричного перетворення. Йдеться про перехід до перетворення попередньо сконцентрованого сонячного

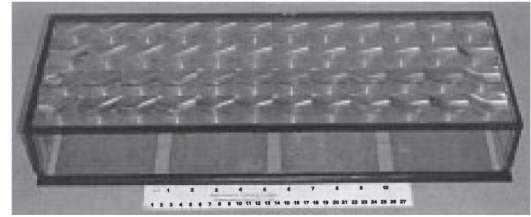


**Рис. 14.** а – поперечний розріз концентруючого модуля: 1 – основа лінзової панелі, виконана зі скла; 2 – мікропризми лінз Френеля, виконані з силікону; 3 – сфокусовані сонячні промені, 4 – сонячний елемент, змонтований на металевій основі; 5 – основа панелі сонячних елементів, виконана зі скла. б – система з вторинними мінілінзами для збільшення кратності концентрування сонячного випромінювання [4].

випромінювання. Гранична розрахункова кратність концентрування випромінювання на відстані від Сонця, яка відповідає орбіті Землі, становить 46200 X.

Те, що гетероперехідні сонячні фотоелементи на основі арсеніду галію можуть ефективно працювати при значному (в сотні і навіть тисячі разів) концентруванні світлового потоку і вигідно

відрізняються в цьому відношенні від кремнієвих, було відзначено ще на рубежі 1970-х-1980-х років. До цього часу відносяться перші досліди по



**Рис. 15.** Експериментальний фотоелектричний модуль для перетворення концентрованого сонячного випромінювання з панеллю з 48 лінз Френеля [4].

створенню концентруючих фотоелектричних модулів з сильноточними гетерофотоелементами [31]. Генерований фотострум зростає лінійно зі збільшенням світлового потоку, а вихідна напруга в свою чергу зростає зі збільшенням струму за логарифмічним законом. Таким чином, вихідна потужність росла надлінійно при концентруванні випромінювання та ефективність фотоелектричного перетворення збільшувалася.

З початку 1990-х років у практиці створення сонячних концентраторних систем виник новий напрям, що базується на концепції малорозмірних модулів, що мають всі передумови для забезпечення високоефективного і економічно виправданого фотоелектричного перетворення сонячного випромінювання [32-37].

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. Малорозмірні лінзи Френеля тут об'єднані в інтегральну панель. У панель об'єднані також і змонтовані на тонких (0.5 мм) металевих тепловідведення концентруючі фотоелементи. Обидві ці панелі скріплені скляними боковими стінками, так що внутрішній об'єм модуля герметизований (рис.14, рис.15). При перетворенні концентрованого сонячного випромінювання з ефективністю близько 40% з використанням пристроїв для стеження за сонцем, питома (на одиницю площі) перетвореної кількості електроенергії збільшується в 2-2,5 рази в порівнянні з установкою на основі кремнієвих ФЕП, що перетворюють пряме сонячне випромінювання.

### 5.3 Сонячні елементи на основі сенсibilізованих

**барвниками напівпровідників (СБСЕ).** СБСЕ представляють собою наноінженерний пристрій в якому, завдяки вдалому поєднанню властивостей матеріалів, вдалося реалізувати фотовольтаїчне перетворення, багато в чому близьке до фотосинтезу. Застосування недорогих технологій та матеріалів відкриває можливість широкого виробництва та охоплення ринку. Величезний прогрес, досягнутий

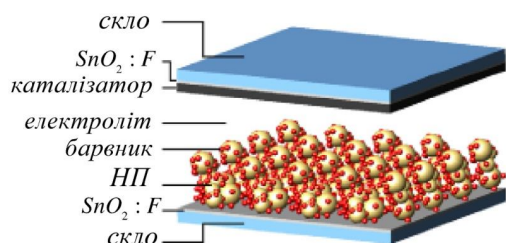


Рис. 16. Схема компонування СБСЕ[38].

останнім часом у розробці нанодисперсних матеріалів заданої морфології, дозволяє прогнозувати збільшення ефективності та підвищення стабільності характеристик СБСЕ. Ідея фотоелектрохімічного елемента на основі сенсibilізованого нанодисперсного діоксиду титану була запатентована в 1990 р. [39], і розвинута в серії робіт [40-43]. В якості робочого матеріалу для СБСЕ застосовується сенсibilізований барвником нанодисперсний оксидний напівпровідник; поглинання випромінювання та транспортування фотогенерованих носіїв відбувається у різних функціональних середовищах, що дозволяє гнучко керувати цими процесами.

Схема компонування СБСЕ та діаграма електронних переходів в ньому представлені відповідно на рис.16. Оксидна плівка нанокристалічної морфології (питома поверхня 60-150 м<sup>2</sup>/г, типова пористість 50-65%, середній розмір частинок 10-30 нм, середній розмір пор 15 нм), покрита моношаром органічного барвника, характеризується широкою областю поглинання (від УФ до ближньої ІЧ областей спектру) і дозволяє захопити 70-90% фотонів сонячного випромінювання.

Поглинувши фотон, молекула барвника-сенсibilізатора, хемосорбованого на поверхні нанодисперсного широкозонного оксидного напівпровідника (НП) n-типу, переходить в збуджений стан, що відповідає переносу електрона з найвищої заповненої молекулярної орбіталі на найнижчу незаповнену орбіталь. Релаксація збудженого стану молекули барвника відбувається через інжекцію електрона в зону провідності НП, який виступає в ролі транспортного середовища. З НП електрони переходять на колектор зарядів – фронтальний електрод, яким служить скляна пластинка, покрита провідним прозорим оксидом (SnO<sub>2</sub>:F, SnO<sub>2</sub>:Sb, In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Омичний контакт між провідним шаром на внутрішній поверхні фронтального електрода та мезопористою плівкою НП досягається шляхом запорювання при температурі 350-450 °С. Перенос

заряду в зоні провідності НП відбувається шляхом дифузії електронів до фронтального електрода. Окислені молекули барвника відновлюються шляхом переходу електрона з електроліту. Реакція відбувається поблизу протиелектрода, покритого шаром каталізатора (Pt, графіт), на який через зовнішнє навантаження, замикаючи коло, переходить електрон з фронтального електрода. Різниця потенціалів, що генерується при освітленні дорівнює різниці між рівнем Фермі для нанодисперсного оксиду і редокс-потенціалом електроліту. Найпоширеніший тип електроліту – органічний розчинник, що містить редокс-пари йодиту та трийодиту I<sup>-</sup>/I<sub>3</sub><sup>-</sup>.

## Висновки

1. Показано що сонячна енергія є ключовим чинником розвитку енергетичної галузі з виробництва побутових сонячних батарей, а також зростаючим інтересом до виробів фотовольтаїки для космонавтики, телекомунікацій та портативних джерел живлення.

2. Встановлено, що основні зусилля дослідників зосереджені на підвищенні ефективності фотоелектричного перетворення, зниження вартості матеріалів і виробництва, підвищенні надійності приладів, на впровадженні нових тонкоплівкових та нано технологій разом з моно- і полікристалічними технологіями.

3. Проведеноаналіз ФЕП сонячної енергії на основі кристалічного і аморфного кремнію, звернено увагу на способи їх формування і структуру, проведено основні їх характеристики.

4. Показано що формування квантових дрітків у матриці кристалів кремнію у значній мірі розв'язує проблему із процесом поглинання сонячного випромінювання і виведенням носіїв заряду з об'єму структури.

5. Застосування нанотехнологій у виробництві СЕ відкриває можливості збільшення ефективності перетворення сонячної енергії в електричну і суттєвого зменшення витрати напівпровідникового матеріалу.

*Робота виконана при фінансуванні в рамках держбюджетної теми №01100000144 міністерства освіти і науки, молоді та спорту України*

**Фреїк Д.М.** – заслужений діяч науки і техніки України, доктор хімічних наук, професор, директор Фізико-хімічного інституту, завідувач кафедри фізики і хімії твердого тіла;

**Чобанюк В.М.** – кандидат фіз.-мат. наук, доцент, проректор;

**Галушак М.О.** – доктор фізико-математичних наук, проректор;

**Криницький О.С.** – аспірант;

**Матейк Г.Д.** – кандидат фізико-математичних наук, доцент.

- [1] Мейтин М. Пусть всегда будет солнце // *Электроника: Наука, Технология, Бизнес*, сс.40-46(2000).
- [2] Kuznicki Z.T., Multiinterfase Solar Cells I. Limits, Modeling, Desing//*First Polish-Ukrainian Symposium "New Photovoltaic Materials for Solar Cells"*, E-MRS, Krakow (Poland), сс. 58-78(1996).
- [3] Ефимов В.П. Фотопреобразователи энергии солнечного излучения нового поколения// *ФПП ФПП PSE*, **8**(2), (2010).
- [4] Алфёров Ж.И., Андреев В.М., Румянцев В.Д. Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики // *Физика и техника полупроводников*, **38**(8), сс. 937-948 (2004).
- [5] World map of the PV Industry // *SUN & WIND ENERGY* **4**, pp.120-126 (2008).
- [6] P.V. Status Reports 2009. // *Joint Research Center*, pp. 13-17(2009).
- [7] Adams W.G., Day R.E. // *Phil. Trans. R. Soc.*, **167** (1) 313 (1877)
- [8] Ioffe A.F., Ioffe A.V. // *Phys. Z. Sov. Un.*, **343**(7) (1935).
- [9] Chapin D.M., Fueller C.S., Pearson G.L.// *J. Appl. Phys.*, **676**(25) (1954).
- [10] Sweet W., *Power & energy. Technology 1999 analysis & forecast* // *IEEE Spectrum*. – **36**(1) pp. 62-67 (1999).
- [11] A. Jager-Waldau // *Thin Solid Films*. **451-452**, pp. 448-454 (2004).
- [12] Goswami D.Y., New and emerging developments in solar energy // *Solar Energy*, **76**, pp. 33-43 (2004).
- [13] Goetzberger A. Photovoltaic materials, history, status and outlook // *Material Science and Engineering*, **40**, pp. 1-46 (2003).
- [14] Green M.A. Photovoltaics: technology overview // *Energy Policy*. – **28**(14), pp. 989-998(2000).
- [15] Roedem, B. Thin-film PV module review: Changing contribution of PV module technologies for meeting volume and product needs// *Refo-cus.*, **7**(4), pp. 34-39 (2006).
- [16] Kazmerski L.L. Photovoltaics: A review of cell and module technologies // *Renewable and Sustainable Energy Reviews.*, **1**(1,2). pp. 71-170 (1997).
- [17] Green M.A. Crystalline and thin film silicon solar cells: state of the art and future potential // *Solar Energy.*, **74** pp. 181-198 (2003).
- [18] Гременок В.Ф., Тиванов М.С., Залеский В.Б. // *Солнечные элементы на основе полупроводниковых материалов*. Изд. Центр БГУ, Минск, с.222 (2007).
- [19] Андреев В.М. Гетероструктурные солнечные элементы//*ФТП*. – **33**(9) сс.1035-1038 (1999).
- [20] Terakawa A., Matsunami H. Hydrogen elimination model of the formation of hydrogen bonding structures during the growth of hydrogenated amorphous silicon by plasma CVD//*Phys. Rev. B.*, **62**(24) pp. 16808-16814,(2000).
- [21] Allan G., Delerue C., Lannoo M. Electronic Structure of Amorphous Silicon Nanoclusters//*Phys. Rev. Lett.* – **78**(16) pp. 3161- 3164(1997).
- [22] Dovbnya A.N., Yefimov V.P., Abyzov A.S., Rybka A.V., Zakutin V.V., Reshetnyak N.G., Blinkin A.A., Romas'ko V.P. Procedure of nanodimensional amorphous-microcrystalline structure formation by radiation in single crystal silicon. Series: Nuclear Physics Investigation (52)//*Problems of Atomic Science and Technology.*, **5** pp. 67-745. (2009)
- [23] Омаров Ф.Ф., Ювченко В.Н. Модель термического пика для описания трекообразования в кристаллах полупроводников, облучаемых тяжелыми высокоэнергетичными ионами//*ЖТФ*. – **73**(6), сс. 56-60 (2003).
- [24] Kondratenko M.Ya., Petrzhak K.A. Yields of <sup>235</sup>U photofission fragments//*Atomnaya Ehnergiya.*, **6** pp. 556-561 (1967).
- [25] Nsakalagos L., Balch J., Fronheiser J., Korevaar B.A., Sulima O., Rand J. Silicon nanowire solar cells//*Appl. Phys. Lett.*, **91**, pp. 233117(1)-233117(3) (2007).
- [26] Айвазов А.А. , Будагян Б.Г., Вихров С.П., Попов А.И.//*Неупорядоченные полупроводники*, М.:Высшая школа, с.352 (1995)
- [27] Guha S. , Yang J., Banerjee A. , Glat felter T. Amorphous Silicon Alloy Solar Cells for Space Application. // *Proc. of the 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion*.
- [28] . Green M.E., Emery K, King D.L., Igary S, Warta W. Progr. Photovolt.// *Res. Appl.*, **10**(355), (2002).
- [29] Bailey S.G., Flood D.F. // *Progr. Photovolt.*, **6**(1), (1998).
- [30] King R.R. et al. Proc. 28th IEEE Photovolt. Specialists //*Conf.IEEE, N.Y.*, pp. 998(2000)
- [31] Алфёров Ж.И., Андреев В.М., Арипов Х.К., Ларионов В.Р., Румянцев В.Д. // *Гелиотехника*, **6**(3),(1981).
- [32] . Andreev V.M, Grilikhes V.A., Rumyantsev V.D.. Photovoltaic Conversion of Concentrated Sunlight // *John Wiley & Sons Ltd*, (1997).
- [33] Andreev V.M., Khvostikov V.P., Rumyantsev V.D., Paleeva E.V., Shvarts M.Z., Algora C. Technical Digect of the International PVSEC-11 // *Sapporo, Japan*, pp. 147. (1999)
- [34] Rumyantsev V.D., Hein M., Andreev V.M., Bett A.W, Dimroth F., Lange G., Letay G., Shvarts M.Z., Sulima O.V.. Proc. 16th Eur. Photovolt. Solar Energy Conf. // *Glasgow*, pp.2312. (2000)
- [35] Hein M., Meusel M., Baur C., Dimroth F., Lange G, Siefer G., Tibbits T.N.D, Bett A.W., Andreev V.M., Rumyantsev V.D. Proc. 17th Eur. Photovolt. Solar Energy Conf. // *Munich, Germany*, pp. 496. (2001)
- [36] Rumyantsev V.D., Chosta O.I., Grilikhes V.A., Sadchikov N.A, Soluyanov A.A., Shvarts M.Z., Andreev V.M.. Proc. 29th IEEE Photovolt Specialists Conf. // *New Orleans*, pp. 1596., (2002)

- [37] Rumyantsev V.D., Andreev V.M., Sadchikov N.A., Bett A.W., Dimroth F., Lange G. Proc. Conf. „PV in Europe“ // *Rome* (2002).
- [38] Остафійчук Б.К., Миронюк І.Ф., Коцюбинський В.О., Глуханюк В.Д., Челядин В.Л., Нагірна Н.І. Сонячні елементи на основі сенсibiliзованих барвниками напівпровідників (огляд) // *Фізика і хімія твердого тіла*. **9**(1), с.11-18 (2008)
- [39] Gratzel M. US Patent 4,927,721, (1990).
- [40] O'Regan B, Gratzel M. A low cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO<sub>2</sub> films. // *Nature* **353**, pp.737–739 (1991).
- [41] O'Regan, B.; Moser, J.; Anderson, M.; Grätzel, M. Vectorial Electron Injection into Transparent Semiconductor Membranes and Electric-Field Effects on the Dynamics of Light-Induced Charge Separation. // *J. Phys. Chem.*, **94**, pp.8720-8726 (1990).
- [42] Smestad G., Bignozzi C., Argazzi R. Testing of dye sensitized TiO<sub>2</sub> solar cells I: Experimental photocurrent output and conversion efficiencies // *Solar Energy Materials and Solar Cells* **32**, pp.259-272 (1994).
- [43] Smestad G. Testing of dye sensitized TiO<sub>2</sub> solar cells II: Theoretical voltage output and photoluminescence efficiencies // *Solar Energy Materials and Solar Cells* **32**, pp. 273-288 (1994).

D.M. Freik<sup>1</sup>, V.M. Chobanyuk<sup>1</sup>, M.O. Galuschak<sup>2</sup>, O.S Krunutcky<sup>2</sup>, G.D. Mateik<sup>2</sup>

## Photovoltaic Converters of Solar Radiation. Achievements, Current Status and Trends (Review)

<sup>1</sup>Vasyl Stefanyk PreCarpathian National University

57, Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk, 76018, Ukraine, E-mail: [fcss@pu.if.ua](mailto:fcss@pu.if.ua)

<sup>2</sup>Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, 15, Carpathian Str.,  
Ivano-Frankivsk, 76001, Ukraine

The analysis of developments in the field of photovoltaic conversion of solar energy into electricity. The main attention is paid to the principles of solar cells on monocrystalline and amorphous silicon, nanostructures.

**Key words:** Solar energy, technological aspects of formation, structure, solar cells, silicon, nanostructures.