

Лекція 7

Фотоелектричні перетворювачі сонячного випромінювання. Досягнення, сучасний стан, тенденції розвитку

План

Вступ

1. Сонячні батареї
 - 1.1. Батарея з монокристалів
 - 1.2. Тонкоплівкові батареї
 - 1.3. Полікристалічні батареї
2. Основні принципи роботи і будова сонячних елементів
3. Фотоперетворювачі на основі кремнію
 - 3.1. Кристалічний кремній
 - 3.2. Аморфний гідрований кремній
 - 3.3. Наноструктури на основі кремнію
4. Сонячні елементи нового покоління
 - 4.1. Каскадні сонячні елементи
 - 4.2. Елементи із концентрованим сонячним випромінюванням
5. Переваги використання сонячних батарей. Ситуація в Україні

Висновки

Список використаних джерел

Мета лекції: зробити уявлення про будову і принцип роботи фотоперетворювачів на основі монокристалічного і аморфного кремнію, показати будову різних типів сонячних батарей, визначити їх переваги використання.

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 XXI-му столітті.

Джерелом енергії сонячного випромінювання служить термоядерна реакція - кожен 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 досить стабільному стані понад 10 млрд. років з постійним виділенням енергії. Інтенсивність сонячного випромінювання у вільному просторі на відстані, рівній середній відстані між Землею і Сонцем, називається сонячною сталою. Її величина - 1353 Вт/м². 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 "повітряною масою" (AM). AM визначається як секанс кута між Сонцем і зенітом.

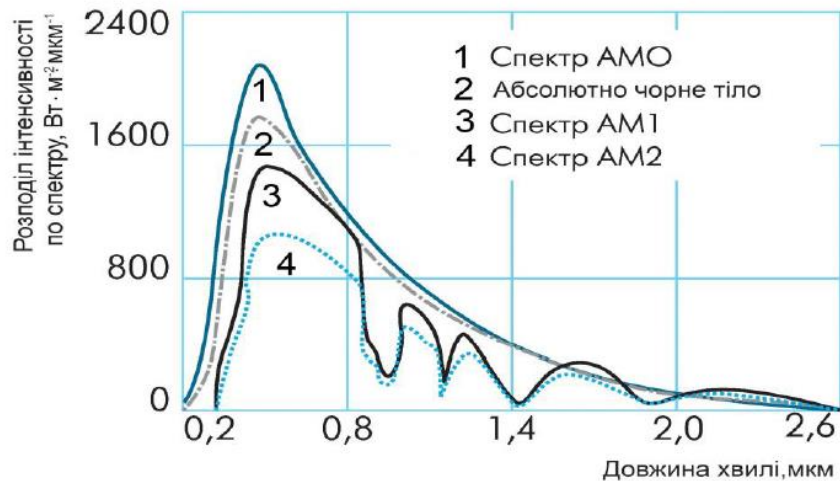


Рис. 1. Розподіл інтенсивності у спектрі сонячного випромінювання

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. Криві AM1 і AM2 ілюструють спектральний розподіл сонячного випромінювання на поверхні Землі, коли Сонце в zenіті і при куті між Сонцем і zenітом 600, відповідно.

Середня інтенсивність випромінювання на Землі приблизно збігається з інтенсивністю випромінювання при AM = 1,5 (Сонце - під кутом 450 до горизонту) [1]. Таким чином, при використанні високоефективних методів перетворення енергії Сонце може забезпечувати бурхливо зростаючі потреби в ній практично вічно. Такий прогноз робить обґрунтованими 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 СЕ з великою площею ФЕ з величиною $\eta \sim 5 - 8\%$ (II- покоління ФЕ). Концепція III-покоління - це використання нано- та мікроструктур (мікродротів).

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 тіньових ділянках орбіти [4].

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.

На рис. 2 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 CO₂, що еквівалентно зупинці 150 вугільних електростанцій.

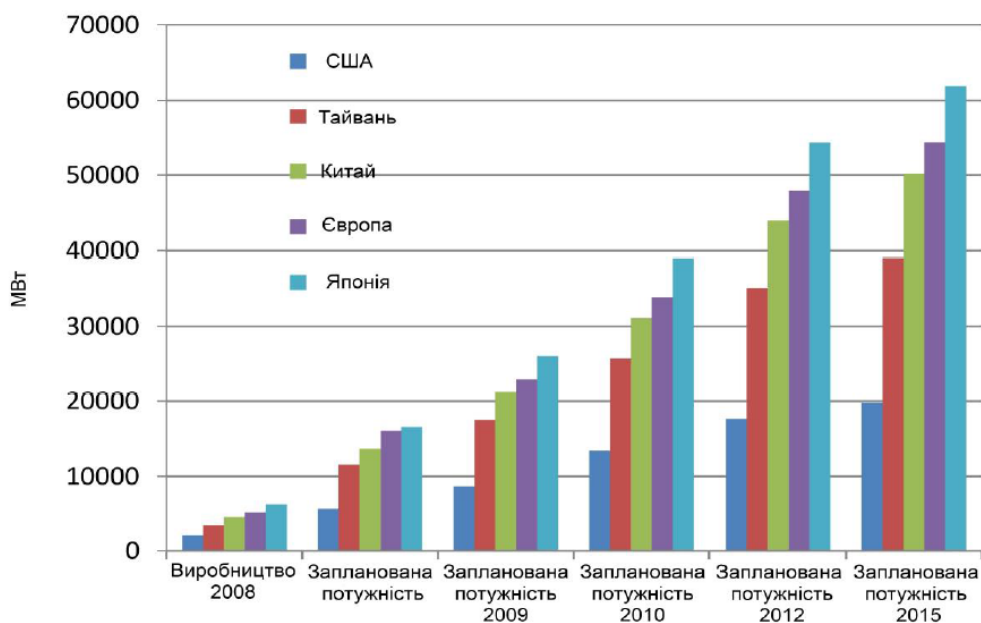


Рис. 2. Заплановане кумулятивне зростання сонячної фотоенергетики в світі до 2015 року

1. Сонячні батареї

Сонячна батарея (панель) є фотоелектричним генератором, принцип роботи якого заснований на фізичних властивостях напівпровідників. Термін служби сонячної батареї в основному досягає 25 років.

На сьогоднішній день на ринку збуту переважають в основному три види сонячних батарей - це тонкоплівкові, монокристалічні і полікристалічні сонячні панелі. Технологія, за якою виготовлена сонячна батарея, впливає на її ККД. Вважається, що в ідеалі сонячна батарея має близький до 20% ККД. Однак на він приблизно дорівнює всього 10%, при тому, що для якихось сонячних батарей більше, для якихось менше. В основному це залежить від технології, за якою виконаний р-n перехід. Найбільш ходовими і маючими найбільший відсоток ККД продовжують бути сонячні батареї, виготовлені на основі монокристалу або полікристалу кремнію. Причому другі через відносну дешевизну стають дедалі поширенішим. До якого типу конструкції сонячна батарея відноситься можна визначити неозброєним оком.



Рис.3. Батареї: а-монокристалічні;б- полікристалічні; в- тонкоплівкові

1.1. Батареї з монокристалів

Вони мають надійний і міцний склопластиковий корпус. Завдяки йому всередину установки волога не проникає, тому дані установки можна використовувати на кораблях далекого плавання. Більш надійними і довговічними сонячні батареї робить відсутність рухомих елементів. Сфера

застосування монокристалічних сонячних батарей досить широка, це може бути і зарядка акумуляторів, електроживлення для садових насосів, забезпечення живлення бортового обладнання корабля, освітлення садових і присадибних ділянок, живлення сигналізації і засобів зв'язку, і так далі.

Найбільш популярними серед покупців є монокристалічні сонячні батареї. Цей тип батарей складається з величезної кількості силіконових осередків. Силіконові осередки виконують функцію перетворення електричної енергії з сонячних променів, що потрапляють на їх поверхню. Найбільш оптимальною кількістю осередків у монокристалічних батареях вважається 36. Це досить добре відбивається на виробленні електроенергії. Монокристалічні батареї досить легкі й компактні, здатні трохи згинатися. Завдяки цій властивості, не складе особливих труднощів установка даних батарей на нерівних поверхнях, де складно буде домогтися правильного кута нахилу.

У даного виду сонячних батарей максимальна потужність досягається за умов, якщо небо буде ясным, температура повітря - 25 градусів Цельсія, панелі будуть направлені прямо на сонці. Значно знизити потужність установки може навіть невелика хмарність (близько 70%), а в разі сильної хмарності можна вважати що робота сонячної батареї блокована, так як потужність знижується на 90%. Для того що б отримати оптимальну потужність, діапазон температур повітря повинен коливатися в рамках 15 - 25 градусів Цельсія. Для наших широт зміна сонячної енергії, безпосередньо залежить від сезону. Для того щоб не змінювати постійно, напрямок панелей рекомендується встановити їх у напрямку до екватора, відхилення має дорівнювати широті місцевості.

1.2. Тонкоплівкові сонячні батареї

Вважаються найбільш дешевим варіантом з усіх існуючих видів батарей. Це досить чітко відображено на попиті даного виду батарей у

споживачів. Цей вид батарей можна встановлювати в будь-якому місці, найбільш зручному для Вас, це може бути стіна будівлі, дах або ж земельна ділянка. На відміну від монокристалічних батарей, тонкоплівковим сонячним батареям не потрібні прямі промені сонця. За потужністю вони також більш зручні, ніж інші види, тому що навіть при похмурій погоді вони втрачають потужність всього на 10 - 15%. Єдине що можна назвати мінусом для даного виду сонячних батарей це займана площа, практично в 2,5 рази більше, ніж у інших. Застосовуються вони в основному для більш великих систем електропостачання, рідко для побутових потреб.

1.3. Полікристалічні сонячні батареї

Ці батареї також вважаються альтернативним варіантом монокристалічних батарей. У їх будові застосовано полікристалічний кремній, що має яскраво синій колір. Полікристалічні сонячні батареї широко застосовані для освітлення дворів, парків, вулиць, шосе, лікарень, кафе, шкіл, приватних будинків, засобів зв'язку, а також для енергопостачання газопроводів і нафтопроводів, зарядки акумуляторів.

2. Основні принципи роботи і будова сонячних елементів

Принцип дії сучасних сонячних батарей зберігся, незважаючи на багаторічну історію їх існування. Удосконаленню піддалася лише конструкція і матеріали, що використовуються у виробництві, завдяки яким виробники поступово збільшують такий важливий параметр, як коефіцієнт фотоелектричного перетворення або ККД пристрою. Варто також сказати, що величина вихідного струму і напруги сонячної батареї безпосередньо залежить від рівня зовнішньої освітленості, який впливає на неї.

Найпростіша конструкція сонячного елемента (СЕ) - приладу для перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну - показана на рис. 4.

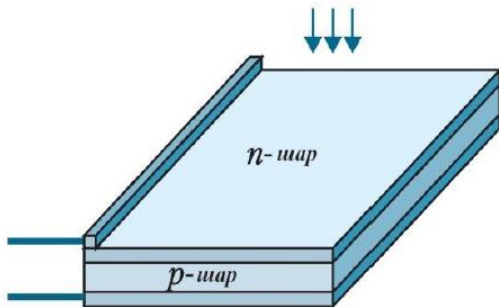


Рис. 4. Конструкція сонячного елемента

На малій глибині від поверхні кремнієвої пластини p сформований p - n -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 p -шарі поблизу p - n -переходу, підходять до p - n -переходу і існуючим в ньому електричним полем виносяться в n -область. Аналогічно і надлишкові дірки, створені в n -шарі, частково переносяться в p -шар (рис. 5а).

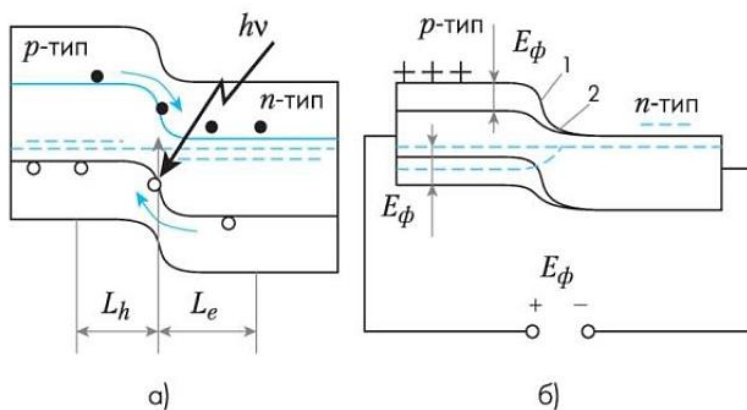


Рис. 5. Зонна модель розімкнутого p - n -переходу: а) - в початковий момент освітлення; б) - зміна зонної моделі під дією постійного освітлення і виникнення фото ЕРС

У результаті n-шар набуває додаткового негативного заряду, а р-шар - позитивний. Знижується первісна контактна різниця потенціалів між р-і n-шарами напівпровідника, і в зовнішньому ланцюзі з'являється напруга (рис. 5б). Негативному полюсу джерела струму відповідає n-шар, а р-шару - позитивному. Величина становленої фото - ЕРС при освітленні переходу випромінюванням постійної інтенсивності описується рівнянням вольт-амперної характеристики (ВАХ):

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

де I-загальний струм, I_s -струм насичення, а I_{ph} – фотострум, k-стала Больцмана, T-абсолютна температура, q-заряд електрона.

Матеріал, з якого виготовлені пластини, впливає на характеристики сонячних батарей. Чистий кремній у виробництві пластин для сонячних батарей практично не використовується. Найчастіше в якості домішок для виготовлення пластини, що виробляє позитивний заряд, використовується бор, а для негативно заряджених пластин миш'як. Крім них при виробництві сонячних батарей все частіше використовуються такі компоненти, як арсенід, галій, мідь, кадмій, теллурид, селен та інші. Завдяки ним сонячні батареї стають менш чутливими до перепадів оточуючих температур.

Більшість сонячних батарей можуть накопичувати енергію, представляючи собою системи. Одержана електрична енергія накопичується в акумуляторах, а потім віддається в навантаження. Акумулятори – хімічні джерела струму. Заряд акумулятора відбувається тоді, коли до нього прикладена потенціал, який більший від напруги акумулятора. Число послідовно і паралельно з'єднаних сонячних елементів повинно бути таким, щоб робоча напруга підводиться до акумуляторів з урахуванням падіння напруги та трохи перевищувала напругу акумуляторів, а навантажувальний струм батареї забезпечував необхідну величину зарядного струму.

Наприклад, для зарядки свинцевої акумуляторної батареї 12 В необхідно мати сонячну батарею яка складається з 36 елементів.

При слабкому сонячному світлі заряд акумуляторної батареї зменшується і батарея віддає електричну енергію електрообладнанню, тобто акумуляторні батареї постійно працюють у режимі розряду і підзаряду. Це процес контролюється спеціальним контролером. При циклічному заряді потрібна постійна напруга або постійний струм заряду. При гарній освітленості акумуляторна батарея швидко заряджається до 90% своєї номінальної ємності, а потім з меншою швидкістю заряду до повної ємності. Перемикання на меншу швидкість заряду проводиться контролером зарядного пристрою.

Найбільш ефективним є використання спеціальних акумуляторів – гелієвих (у батареї в якості електроліту застосовується сірчана кислота) і свинцеві батарей, які зроблені за AGM-технології. Цим батареям не потрібні спеціальні умови для встановлення і вони не потребують обслуговування. Паспортний термін служби таких батарей – 10 — 12 років при глибині розряду не більше 20%. Акумуляторні батареї ніколи не повинні розряджатися нижче цього значення, інакше їх термін служби різко скорочується!

Акумулятор під'єднується до сонячної батареї через контролер, який контролює її заряд. При заряді батареї на повну потужність до сонячної батареї підключається резистор, який поглинає надлишкову потужність. Для того щоб перетворювати постійну напругу від акумуляторної батареї в змінну напругу, яку можна використовувати для живлення більшості електроприладів спільно з сонячною батареєю можна використовувати спеціальні пристрої – інвертори. Без використання інвертора від сонячної батареї можна жити електрообладнання, яке працює на постійній напрузі, в т. ч. різну портативну техніку, енергозберігаючі джерела світла, наприклад, ті ж світлодіодні лампи.

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;
- генеровані при освітленні електрони і дірки мають 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 в процесі роботи;
- структура тонкої плівки повинна бути однорідною по всій активній області сонячного елемента, щоб виключити закорочування і вплив шунтуючих опорів на характеристики елемента.

3. Фотоперетворювачі на основі кремнію

3.1. Кристалічний кремній.

Монокристалічні кремнієві сонячні елементи (с-Si CE) 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].

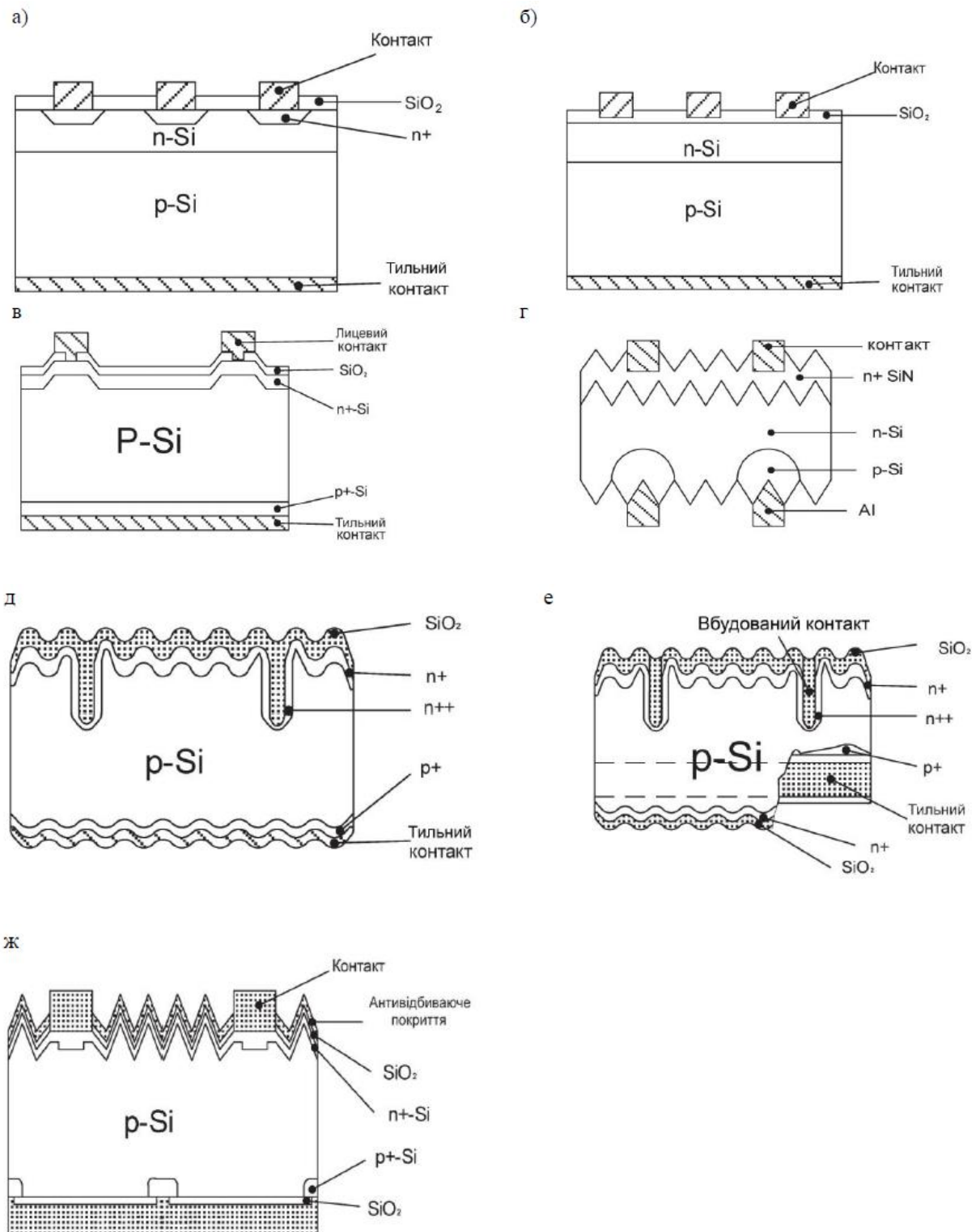


Рис. 6. Різні типи сонячних елементів на основі монокристалічного кремнію: а) простий p-n-перехід б) метал-ізолятор-n-p-структура (MINP) в) сонячний елемент із пасивуючим емітером (PESC) г) двошлицьовий сонячний елемент д) структура з однобічним вбудованим контактом (SSBS) е) структура із

двостороннім вбудованим контактом (DSBS) ж) структура з пасивуючим емітером і локальнодифузійним тильним контактом (PERL)

Основний недолік монокристалічних кремнієвих сонячних елементів – велика витрата порівняно дорогого високочистого 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 поглинача полі- і мультикристалічного кремнію.

3.2 Аморфний гідрований кремній

Аморфні сонячні елементи використовують як поглинаючий шар аморфні речовини, що володіють тільки близькою впорядкованістю структури. Ідеальним аморфним матеріалом для використання як поглинача є 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 Шотткі, МОП-структура, p-i-n-структура(рис.7).



Рис. 7 - СЕ на основі аморфного кремнію: а) бар'єр Шоттки 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)

Фотоелектронні властивості найбільш виражені в гідрованому аморфному кремнію ($a\text{-Si:H}$) і мікрокристалічна ($\mu\text{-Si:H}$) і визначаються щільністю розірваних атомних зв'язків. Наявність водню призводить до пасивації електрично активних глибоких рівнів по межах зерен і перехідних областей між аморфною і кристалічною фазами в ($a\text{-Si}$)-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 моногідридному з'єднанні Si-H , оскільки ця конфігурація найбільш стабільна. При отриманні $\mu\text{-Si:H}$ 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 кремнію визначається енергією активації в області 0,5 - 2,7 еВ. Така велика невизначеність викликана сильною залежністю рухливості H від концентрації SH . Водень може дифундувати через дрібні пастки, а захоплюватися розірваними зв'язками (глибокі пастки). При $\text{SH} \sim \text{Cd}$ (Cd - концентрація дефектів) водень мігрує після термічного вивільнення з глибоких пасток. При $\text{SH} \gg \text{Cd}$ 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 Si-H-Si [20]. Оптична ширина забороненої зони $\mu\text{-Si:H}$ залежить від концентрації пов'язаних атомів водню так само, як і в ($a\text{-Si:H}$)-структурах. Різниця в їх величинах полягає в різній концентрації пов'язаних атомів водню. У звичайних плівках ($a\text{-Si:H}$) 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 $10^{-1} \text{ См} / \text{см}$. Це робить даний матеріал придатним для

використання в сонячних елементах в якості прозорого покриття з високою провідністю [19].

У створеній структурі міститься суміш ($\mu\text{-Si:H} + \text{a-Si:H}$). При температурі відпалу до $T \sim 350 - 370 \text{ }^\circ\text{C}$ зберігаються аморфна фаза і $\mu\text{-Si:H}$ (В) з малим розміром кристалітів. При температурі відпалу $T \geq 370 \text{ }^\circ\text{C}$ аморфна фаза відпалюється, залишається $\mu\text{-Si:H}$ (В) 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 $\text{a-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{H}$ більш теплостійкі в порівнянні з плівками a-Si:H , оскільки зв'язок C-H більш сильніший чим зв'язок Si-H. У створених a-Si:H -структурах в c-Si (p, n)-кристалі при радіаційній обробці його ядрами ^{238}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-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 $\sim 300 \text{ мкм}$ 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 SiH₄, H₂ і вирощуються на підкладці з металеві фольги.

Застосовується геометрія з набору мікроструктур у вигляді дротів в коаксіальній формі з p-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.

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

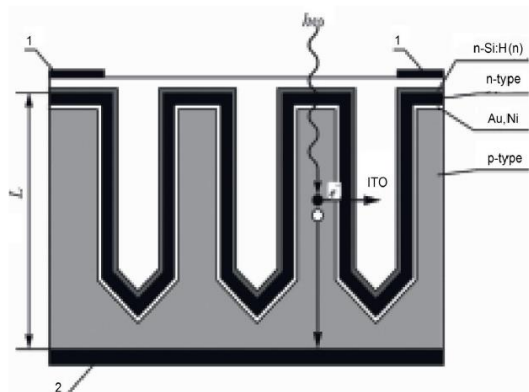


Рис. 8. Схема (архітектура) кремнієвого фотоперетворювача вертикальної конфігурації з мікродротами (California Institute of Technology, USA), 1 – фронтальний контакт, 2 – тильний контакт, L – товщина комірки фотоперетворювача

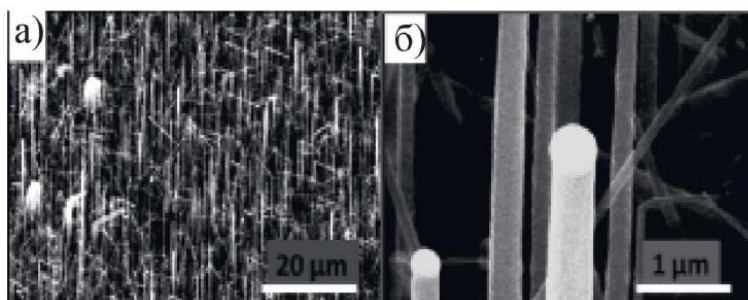


Рис. 9. Типовий приклад Si-мікродротів, вирощених на основі SiH_4 , (структури ФЕ з р-n-переходами в коаксіальному виконанні), California Institute of Technology, USA

Для вирощування мікродротів використовується VLS- Метод (varoliquid-solid) з металевими 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 (рис.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 епітаксiальному шарі матриці область $p^+(n^+)$ буде розширюватися в структуру $p(n)$.

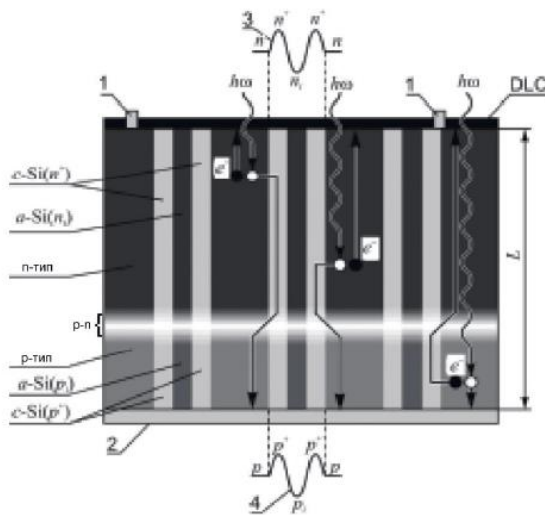


Рис. 10. Схема (архітектура) кремнієвого фотоперетворювача в планарному виконанні із провідними квантовими нитками (NSC КІРТ, Kharkov, Ukraine), 1 – фронтальний контакт, 2 – тильний контакт, L – товщина комірки, 3, 4 – форма квантової нитки в n -і p -структурах кремнієвого фотоперетворювача

4. Сонячні елементи нового покоління

4.1. Каскадні сонячні елементи

Більшість сучасних СЕ володіють одним р-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 енергією не використовуються. Подолати це обмеження дозволяють багатопарові 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 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.

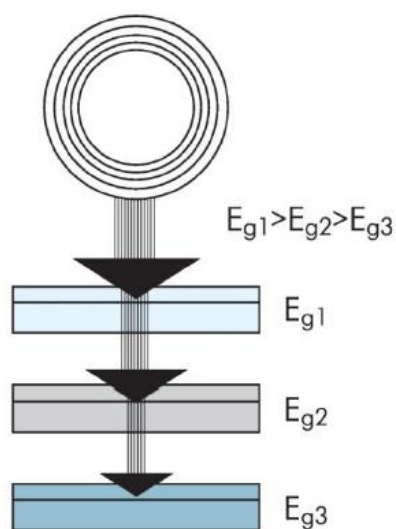


Рис.11. Принцип побудови багатоперехідного сонячного елемента

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 CuInSe_2 .

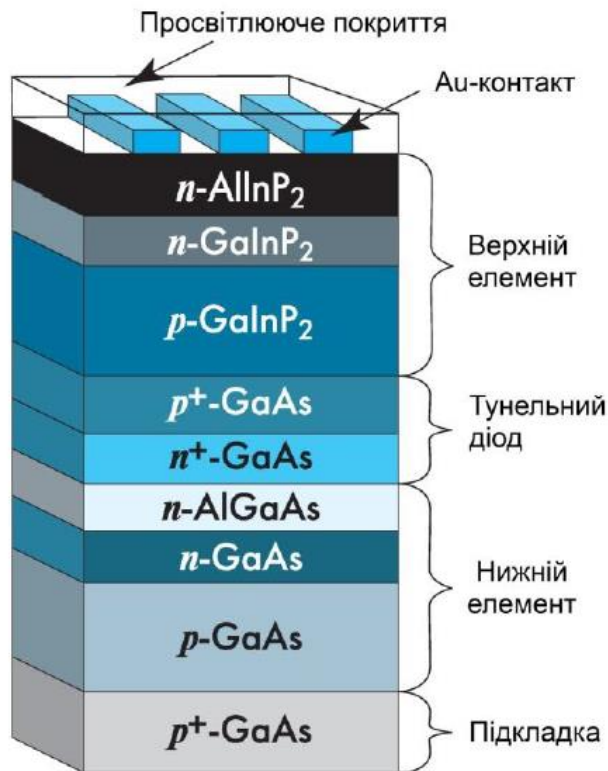


Рис.12. Каскадний елемент

На рис.12 зображена каскадна батарея, в якій верхнім елементом служить структура на основі GaInP з $n\text{-AlInP}$ як вікна, далі йде тунельний діод на

GaAs для проходження носіїв між елементами і нижній елемент з GaAs.

Дуже перспективні каскадні батареї, що 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 $a\text{-Si:H}$ з шириною оптичної щілини 1,8 еВ. Для серединного

елемента в якості шару і-типу використаний сплав α -SiGe:H з вмістом германію ~ 10 - 15% . Ширина оптичної щілини даного шару ($1,6$ eV) ідеальна для поглинання зеленої області сонячного спектра.

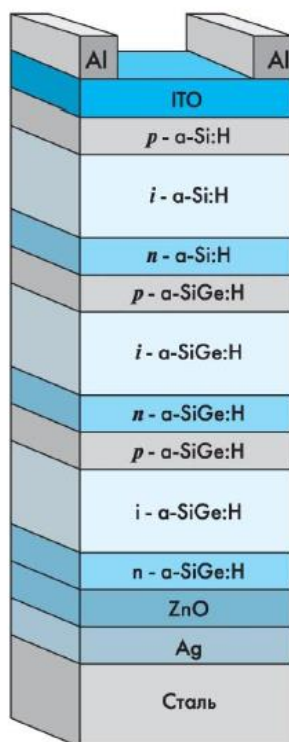


Рис. 13. Трьохкаскадний сонячний елемент на основі сплавів α -SiGe:H

Нижня частина СЕ поглинає довгохвильову частину спектра, для цього використовується шар α -SiGe:H з 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.

4.2 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 випромінювання.

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 створенню концентруючих фотоелектричних модулів з сильно точними 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 фото приймальну 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.

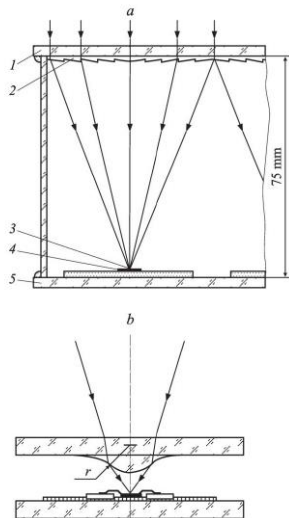


Рис. 14. а – поперечний розріз концентруючого модуля: 1 – основа лінзової панелі, виконана зі скла; 2 – мікропризми лінз Френеля, виконані з силікону; 3 – сфокусовані сонячні промені, 4 – сонячний елемент, змонтований на металевій основі; 5 – основа панелі сонячних елементів, виконана зі скла. б – система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

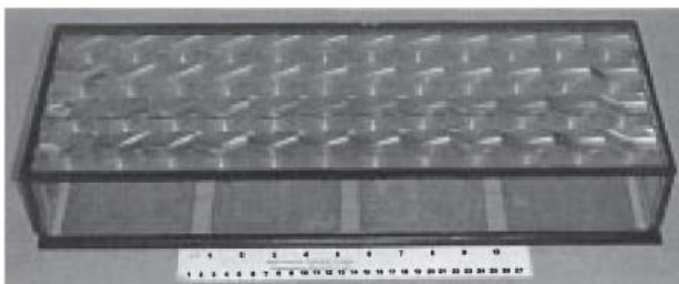


Рис. 15. Експериментальний фотоелектричний модуль для перетворення концентрованого сонячного випромінювання з панеллю з 48 лінз Френеля

5. Переваги використання сонячних батарей. Ситуація в Україні

До переваг використання сонячних батарей можна віднести:

1. Автономність.
2. Висока надійність.
3. Зниження витрат на гаряче водопостачання і опалювання до 85% (сонячна енергія безкоштовна).
4. Економія органічних видів палива (мазуту, нафти, газу).
5. Скорочення викидів двоокису вуглецю.
6. Загальнодоступність і невичерпність джерела.
7. Відсутність проміжних фаз перетворення енергії.
8. Напівпровідникові сонячні батареї мають дуже важливу перевагу довговічність. При тому, що догляд за ними не вимагає від персоналу особливо великих знань і мінімального обслуговування.
9. Теоретично, повна безпека для навколишнього середовища (екологічно чисте джерело енергії) і людини (технічна безпека відповідає всім світовим стандартам).
10. Розповсюдження сонячних установок серед населення і промисловості позитивно впливає на енергетичну безпеку України.

Недоліками сонячних батарей є перманентна залежність потужності від місцевих умов, часу доби і року, відносна дорожнеча, маленький коефіцієнт корисної дії і чутливість до механічних пошкоджень.

Розрахунки показують: щоб одержати великі кількості енергії, сонячні батареї повинні займати величезну площу - тисячі квадратних кілометрів.

Сьогодні виготовити таку величезну кількість сонячних елементів практично неможливо.

Вживані в сучасних фотоелементах надчисті матеріали - надзвичайно дорогі. Щоб їх виготовити, потрібне складне устаткування, вживання особливих

технологічних процесів. Економічні і технологічні міркування поки не дозволяють розраховувати на отримання таким шляхом значних кількостей електричної енергії. Ця задача залишається ХХІ століттю.

Останнім часом вчені у сфері конструювання матеріалів для напівпровідникових фотоелементів – провели ряд робіт, що дозволили наблизити час створення сонячних електростанцій. Коефіцієнт корисної дії сонячних батарей з нових структур напівпровідникових матеріалів досягає вже 30%, а теоретично він може скласти і 90%!

Вживання таких фотоелементів дозволить в десятки разів скоротити площі панелей майбутніх сонячних електростанцій. Їх можна скоротити ще в сотні разів, якщо сонячний потік заздалегідь зібрати з великої площі, сконцентрувати і тільки потім подати на сонячну батарею

Ситуація в Україні

Розвиток альтернативних джерел енергії в Україні, як вже було описано в попередніх статтях, знаходиться у зародковому стані, однак, як і в ситуації з вітроенергетикою, ми маємо непоганий потенціал для розвитку сонячної енергетики. Сьогодні в країні налагоджене власне виробництво високоефективних кремнієвих сонячних батарей із ККД до 20%. А необхідні для комплектації систем електропостачання системи керування, акумуляторні батареї й інвертори, що перетворюють постійний електричний струм у змінний, виробляються в сусідній Росії. Хоча 90% комплектуючих до сонячних батарей сьогодні експортується за кордон, наявність високотехнологічного виробництва дозволяє говорити про можливість виробництва сонячних батарей власного виробництва, що значно здешевить їх кінцеву вартість. Тим більше, що своєрідний «фундамент» у розвиток альтернативних джерел енергії вже закладений Верховною Радою. На початку 2009 року экс- президентом України Віктором Ющенко

був підписаний Закон про стимулювання використання альтернативних джерел енергії. Закон встановлює спеціальний коефіцієнт «зеленого» тарифу для електроенергії з використанням різних альтернативних джерел енергії, на який множиться звичайний тариф для споживачів другого класу напруги. У випадку енергії сонячного випромінювання, відповідно до закону, коефіцієнт має три можливих значення: для наземних об'єктів електроенергетики — 4,8, установлених на дахах будинків, будинків і споруд із величиною встановленої потужності понад 100 кВт — 4,6, а менш 100 кВт, а також установлених на фасадах будь-якої потужності — 4,4. Закон установлює «зелений» тариф на строк до 1 січня 2030 року.

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. Проведено аналіз ФЕП сонячної енергії на основі кристалічного і аморфного кремнію, звернено увагу на способи їх формування і структуру, проведено основні їх характеристики.
3. Показано що формування квантових дротів у матриці кристалів кремнію у значній мірі розв'язує проблему із процесом поглинання сонячного випромінювання і виведенням носіїв заряду з об'єму структури.
4. Застосування нанотехнологій у виробництвів СЕ відкриває можливості збільшення ефективності перетворення сонячної енергії в електричну і суттєвого зменшення витрати напівпровідникового матеріалу.
5. Одним з найперспективніших напрямків енергозабезпечення на сьогодні є сонячна енергетика за рахунок того, що сонячне випромінювання надходить в достатній кількості на майже усю поверхню Землі.

6. Загальним недоліком традиційних електростанцій є згубний вплив на середовище. Альтернативне джерело енергії – сонячні батареї - можуть гарантувати певну екологічну безпеку.

Контрольні запитання

1. Принцип побудови багато перехідного сонячного елемента?
2. Який термін експлуатації фотопанелей?
3. З якого матеріалу виробляють пластини?
4. Які використовують акумулятори?
5. Які умови необхідно дотримуватись для ефективної роботи СЕ?
6. Чи є використання сонячних батарей перспективним у майбутньому?

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

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// *ФІП ФІІІ 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., Залесский 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 ²³⁵U 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., Rummyantsev V.D.. Photovoltaic Conversion of Concentrated Sunlight // *John Wiley & Sons Ltd*, (1997).
33. Andreev V.M., Khvostikov V.P., Rummyantsev V.D., Paleeva E.V., Shvarts M.Z., Algora C. Technical Digest of the International PVSEC-11 // *Sapporo, Japan*, pp. 147. (1999)
34. Rummyantsev 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, Siefert G., Tibbits T.N.D, Bett A.W., Andreev V.M., Rummyantsev V.D. Proc. 17th Eur. Photovolt. Solar Energy Conf. // *Munich, Germany*,pp. 496. (2001)

36. Rummyantsev V.D., Chosta O.I., Grilikhes V.A., Sadchikov N.A, Soluyanov A.A., Shvarts M.Z., Andreev V.M.
37. Proc. 29th IEEE Photovolt Specialists Conf. // *New Orleans*, pp. 1596., (2002)
38. Бабієв Г.М., Дероган Д.В., Щокін А.Р.. Перспективи впровадження нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії в Україні. «ЕЛЕКТРИЧНИЙ Журнал»,- Запоріжжя: ВАТ "Гамма",1998 №1, - С.63-64.
39. Лучков Б.. Солнечный дом — солнечный город // «Наука и жизнь» — № 2, 2002.
40. Сердюк В. В., Чемересюк Г.Г., Терек М.. Фотоэлектрические процессы в полупроводниках. — Киев — Одесса: В. ш., 1982. — 150 с.
41. Пасечкин Л.Л., Попович А.С. “Энергетика: реальность и перспективы”,Киев, 1986г.
42. Экология энергетики. / Под общей редакцией В. Я. Путилова. — М.: Изд-во МЭИ, 2003.
43. Журнал «Пробудитесь» 8.03.05.г. «Доступна ли нам более чистая энергия?».
44. <http://www.powerinfo.ru/sun-power.php>
45. <http://solar.pp.ua/fotoelektrichni-elementy.html>
46. <http://www.energy-bio.ru/pfoto1.htm>
47. www.segodnya.ua/news/785269.html
48. http://www.znaj.ru/html/8103_3.html
49. http://news.uaclub.net/14_429665.html