

В.П. Костильов, А.В. Саченко

НАПІВПРОВІДНИКОВА ФОТОЕНЕРГЕТИКА: СУЧАСНИЙ СТАН І АКТУАЛЬНІ НАПРЯМИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Останнім часом продовжуються роботи з покращення коефіцієнта корисної дії (ККД) фотоперетворювачів сонячної енергії (ФПСЕ), завдяки чому досягнуті значення ККД в ФПСЕ на основі кремнію впритул наблизилась до граничних значень. Активні дослідження в галузі напівпровідникової енергетики ведуться в Інституті фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України. Тому в даному огляді викладено стан досліджень напівпровідникової фотоенергетиці на сьогодні. З аналізу розподілу ринку фотовольтаїки зроблено висновок про домінування в найближчі 10–15 років кремнієвої технології. Наведено рекордні значення ККД ФПСЕ на основі різних матеріалів.

Проаналізовано особливості генераційно-рекомбінаційних процесів і струмопроходження у ФПСЕ на основі *p-n* переходів, а також гетеропереходів аморфний кремній/кристалічний кремній (α -Si:H-c-Si) в широкому діапазоні зміни рівнів збудження як для граничного випадку, коли усуненими механізмами рекомбінації можна знехтувати, так і для реального випадку, коли враховуються усі наявні рекомбінаційні механізми.

Показано, що у випадку великих часів життя нерівноважних носіїв заряду і рівні легування $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$ уже в умовах AM1,5 (1000 Вт/см²) у кремнієвих ФПСЕ реалізується високий рівень збудження. При підвищенні прикладеної напруги, коли $0,7 > V > 0,5$ В, величина чинника неідеальності вольт-амперної характеристики теж дорівнює 2, як і у випадку рекомбінації в області просторового заряду, за рахунок впливу ізотипного бар'єра на тильній поверхні.

Наведено також огляд результатів робіт з розробки фізичних і фізико-технологічних засад створення високоефективних (ККД до 20%, AM1,5) багатобар'єрних ФПСЕ космічного та наземного призначення на основі кремнієвих багатопшарових структур з комбінованими дифузійно-польовими бар'єрами, ФПСЕ з тильними бар'єрами та контактною металізацією, концентраторних ФПСЕ і установок на їх основі, комбінованої фото- і вітрогенераторної установки, що призначена для живлення малопотужної апаратури в польових умовах, виконаних в Інституті фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України.

Ключові слова: сонячна енергетика, сонячні батареї, фотоперетворювачі сонячної енергії, ККД сонячного елемента.

1. АКТУАЛЬНІСТЬ ФОТОЕНЕРГЕТИКИ

За оцінками [1] потреби людства в енергії у порівнянні з нинішнім рівнем споживання до середини ХХІ ст. більш ніж подвояться, а до кінця ХХІ ст. – більш ніж потрояться. Це пов'язано, по-перше, зі зростанням світової економіки в цілому (до 4 разів до 2050 р.), насамперед різким економічним зростанням Китаю і Індії, населення яких становить 2/3 від чисельності населення Землі. По-друге, з помітним зростанням населення Землі – до 2050 року воно досягне 10–11 млрд чоловік. Інтенсивне зростання рівня світового споживання енергії, одержання якої головним чином базується на спалюванні викопних невідтворюваних ресурсів та на атомній енергетиці, створило цілий ряд складних екологічних, технічних, соціальних, а останнім часом і економічних проблем, які вимагають невідкладного вирішення вже зараз [1-4]. Більше того, енергетична незалежність стає одним з найголовніших чинників безпеки будь-якої країни.

2. ЕНЕРГЕТИЧНІ РЕСУРСИ

Проаналізуємо наявні у людства на теперішній час сукупні енергетичні ресурси. До основних невідтворюваних енергетичних ресурсів слід віднести вуглеводневі сполуки – нафта, газ, а також неорганічні – вугілля та уран. За оцінками експертів [2, 3] розвіданих на сьогодні запасів нафти та газу при сучасному споживанні вистачить на 50–60

років, вугілля – на 155 років (при поточному рівні споживання, при щорічному зростанні споживання на 5% – на 45 років). Що стосується ресурсів атомного палива – урану, то, крім його обмеженості і значних витрат на утилізацію відпрацьованого палива, має місце відмова багатьох країн від використання атомної енергетики з причин екології та безпеки. Таким чином, обмеженість традиційних викопних ресурсів буде сприяти зростанню ціни на вироблену з них енергію, яка буде стрімко збільшуватися по мірі їх вичерпання. В той же час відтворювані джерела енергії – Сонце, вітер, біомаса, геотермальні джерела, океанські хвилі та гідроенергія – мають річні ресурси, що значно перевищують енергію, яка споживається усім світом на теперішній час. Зокрема, річна сонячна енергія (рис. 1), що надходить безпосередньо у вигляді фотонів на поверхню Землі, в 2850 разів перевищує споживання, а найменший з перелічених відтворюваних джерел ресурс – гідроенергія – дорівнює споживанню усім людством на теперішній час [5-7].

Таким чином, на початку XXI ст. перед світовою енергетикою постає проблема різкої зміни структури джерел енергії.

Тому останнім часом спостерігається значне посилення інтересу до проблем прямого перетворення енергії Сонця в електричну за допомогою альтернативних, екологічно чистих, поновлюваних джерел енергії. Одне з чільних місць серед екологічно чистих поновлюваних джерел енергії займає пряме перетворення енергії Сонця в електричну енергію, зокрема за допомогою напівпровідникових фотоелектричних перетворювачів енергії – сонячних елементів (СЕ) – напівпровідникова фотоенергетика.

3. ВСТАНОВЛЕНІ ФОТОЕНЕРГЕТИЧНІ ПОТУЖНОСТІ В ЄС ТА СВІТІ

Основою напівпровідникової фотоенергетики є фотovoltaїчний ефект – явище виникнення електричної напруги у речовинах під дією електромагнітного випромінювання (світла). Вперше ефект виникнення електричного струму в освітленому електроліті спостерігав в 1839 році Анрі Беккерель. Однак перший фотоелектричний СЕ був створений тільки через 44 роки американським інженером Ч. Фріттсом. Тому саме 1883 рік прийнято вважати роком початку ери сонячної енергетики [8], хоча перший кремнієвий СЕ за технологією, близькою до сучасної, що включає процес дифузії для створення розділяючого бар'єра (*p-n* переходу), був створений американськими вченими Пірсоном, Фуллером і Чапіним з Bell Laboratories в 1954 р. [9] і мав коефіцієнт корисної дії близько 6%.

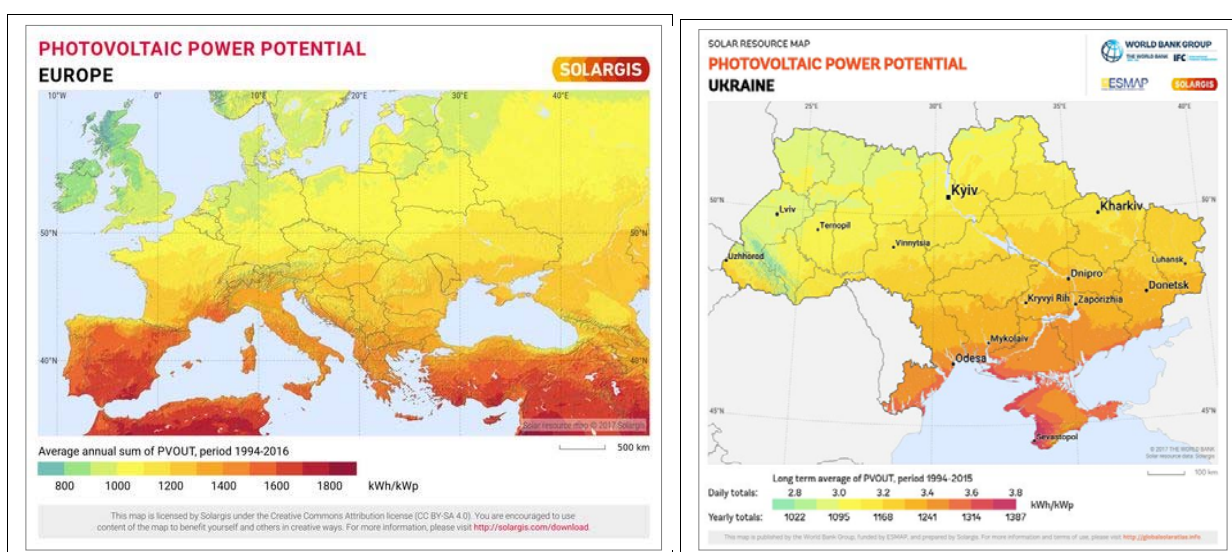


Рис. 1. Розподіл сонячних фотоенергетичних ресурсів в Європі і в Україні (<https://solargis.com/maps-and-gis-data/>).



Рис. 2. Еволюція сумарної встановленої потужності фотоенергетичних електростанцій у світі: сукупно 415 ГВт на 2017 рік, з них 94,6 ГВт у 2017 р. Середньорічний темп зростання між 2010 та 2017 роками становив 24%.

В останні роки має місце значний прогрес в галузі створення високоефективних фотоелектричних перетворювачів сонячної енергії (ФПСЕ) і панелей на їх основі, зменшення їх вартості та використання їх для генерації електроенергії. Зокрема, зростання світового ринку сонячної фотоенергетики в 2017 році до майже 100 ГВт порівняно з 77 ГВт роком раніше (на 30%) вражає навіть експертів у цій галузі. Загальна потужність встановлених у світі фотоенергетичних електростанцій на кінець 2017 року становить 415 ГВт, з них 114,6 ГВт – у Європі, рис. 2.

За останні 10 років загальна потужність встановлених у світі фотоенергетичних електростанцій зростає у 26 разів, а з 2000 року – у 322 рази! Світовими лідерами за загальною встановленою потужністю на 2017 рік є Китай (131 ГВт), США (51 ГВт), Японія (49 ГВт) і Німеччина (42 ГВт), хоча ще три роки тому – у 2014 році – ситуація була іншою: Німеччина (38,2 ГВт), Китай (28,1 ГВт), Японія (23,3 ГВт), Італія (18,5 ГВт) і США (18,3 ГВт). Можна бачити, що велику увагу розвитку фотоенергетики приділяють розвинені країни: США, Японія, Німеччина, Італія. Окреме місце займає Китай, який швидко розвивається і є лідером не тільки за загальною встановленою потужністю, але й за об'ємами виробництва.

В Україні швидкий розвиток фотоенергетики спостерігався протягом 2011-2013 років, в основному зусиллями компанії Active Solar, потужність фотоенергетичних електростанцій якої наближалася до 600 МВт [10]. В 2016 році стало відомо про банкрутство Active Solar і про нового власника 10 станцій – китайську корпорацію CNBM New Energy Engineering Co. Останніми роками теж має місце достатньо швидке зростання, що призвело до загальної встановленої потужності фотоенергетичних електростанцій 938 МВт[10], і подальше зростання активності.

В середньому у світі частка фотоелектричної генерації становить 1,7% від споживаної електроенергії, в Європі – 3,6%, а в Німеччині, Італії та Греції перевищує 7% (рис. 3).

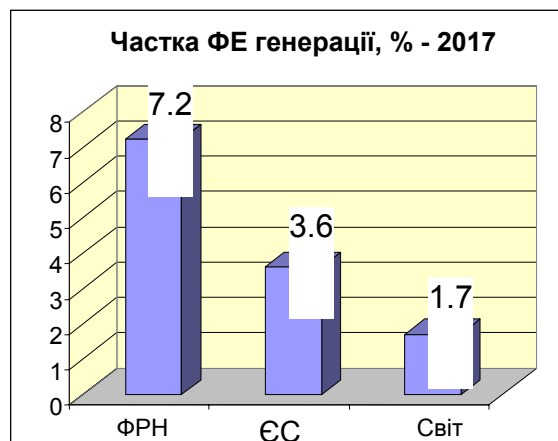


Рис. 3. Частка фотоелектричної (ФЕ) генерації у загальному балансі споживаної електроенергії на кінець 2017 року у ФРН, Європейському Союзі та світі.

4. ЕФЕКТИВНІСТЬ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТА МОДУЛІВ

У виробництві на даний час домінують фотовольтаїчні технології на базі Si підкладок: вони становили близько 95% від загальної кількості виробництва в 2017 році. Частка мультикристалічної кремнієвої технології зараз сягає близько 62% від загального виробництва. У 2017 р. частка ринку всіх тонкоплівкових технологій становила близько 5% від загального річного виробництва.

Протягом останніх років відбулося значне скорочення витрат та суттєве покращення ефективності ФПСЕ, причому це зростання зумовлено постійними покращеннями вартості і ефективності кремнієвих сонячних батарей (СБ) і модулів (СМ), що ускладнює комерціалізацію інших технологій [11]. Незважаючи на те, що має місце покращення ефективності СЕ і СБ і для інших, альтернативних фотоелектричних матеріалів, у тому числі CdTe, $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Se}_2$ і, останнім часом, органічно-неорганічних халькогенідів металів зі структурою перовскітів [11], домінуючою комерційною фотоенергетичною технологією залишається кремнієва з перспективою на зміцнення протягом наступних 10-15 років.

Рекордні значення коефіцієнта корисної дії (ККД) одноперехідних СЕ на основі різних матеріалів та різної конструкції на сьогодні становлять 28,8% (GaAs), 26,7% і 22,3% (моно- і мультикремній відповідно), 21,7% для $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Se}_2$ (CIGS) та 21,0% для CdTe СЕ в умовах АМ 1,5 [12]. Суттєвий прогрес відбувається у зростанні ефективності фотоперетворення у перовскітних СЕ. Протягом 7 років величина ККД в цих СЕ збільшилась до значення 22,3%. Слід відзначити, що наведені значення ККД отримано на монокристалічних кремнієвих СЕ площею 79 cm^2 (на площі 179 cm^2 – 26,6%), в той час як для інших матеріалів площа становила близько 1 cm^2 .

Значення ККД комерційних ФМ (СБ) в залежності від матеріалу, конструкції та технології виготовлення для різних виробників наведено на рис. 4 [6].

Кремній має очевидні переваги для фотоенергетики, а саме: велику кількість (це другий за поширенням елемент у земній корі), міцність, нетоксичність та високі значення ККД (рис. 4), хоча його технологія більш складна та енергоємна, ніж згадані альтернативи [11]. Тим не менше, як фінансові, так і енергетичні витрати кремнієвих ускладнених технологічних процесів продовжують знижуватися, що в основному зумовлено збільшенням обсягів виробництва, так що найбільший внесок у ціну модуля кремнієвої СБ нині походить від інкапсуляції елементів. Аналогічним чином, на рівні системи, наприклад витрати на встановлення модулів, тепер перевищують вартість витрат на виробництво модулів [11].

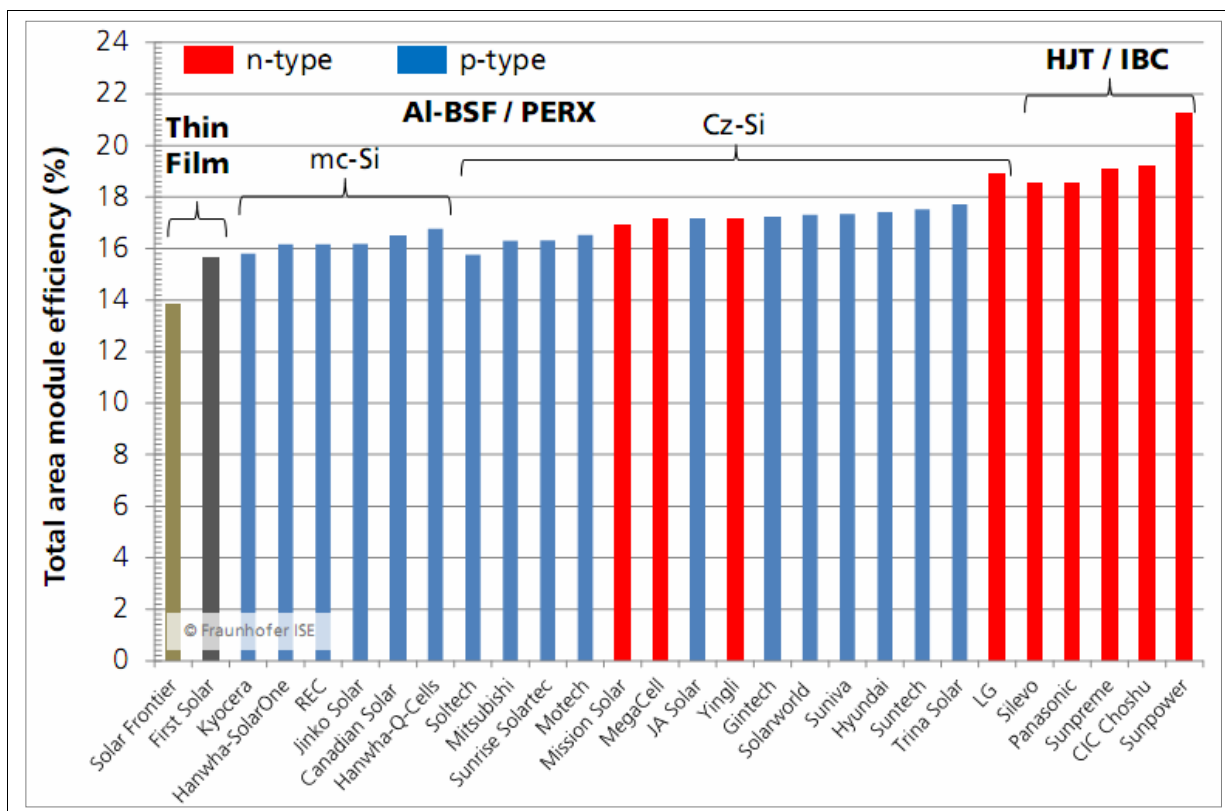


Рис. 4. Поточні ефективності комерційних фотоелектричних модулів за матеріалом, конструкцією та ефективністю на 2018 рік [1].

Витрати на інкапсуляцію і установку, пов'язані з дотриманням індустріальних стандартів, вищі для технологій з нижчою ефективністю перетворення енергії, оскільки для досягнення такої ж вихідної потужності потрібні більші площі модулів. Крім того, некремнієві елементи мають, як правило, нижчу міцність, що вимагає дорожчої інкапсуляції для порівнянної довговічності. Зокрема, для тонкоплівкових модулів CdTe вартість інкапсуляції і тестування становить 60% від загальної розрахункової вартості виробництва, тоді як виготовлення фронтальних і тильних контактів становить ще 20% [11]. Таким чином, модулі і системи на основі альтернативних матеріалів (головним чином CdTe і CIGS) не мають переваг перед кремнієвими, а необхідність великих інвестицій у переобладнання виробництва при переході на CdTe і CIGS технології додатково зменшує їх конкурентоспроможність порівняно з кремнієм.

5. ОСНОВНІ НАПРЯМИ ДОСЛІДЖЕНЬ

З наведених даних випливає висновок про те, що на теперішній час ефективність, тобто ККД СЕ, стає ключовим параметром і кремнієва технологія буде домінувати на ринку ще протягом найближчих років, поки ККД промислових СЕ не досягне значень близько 25% [11].

Тому основними напрямками досліджень для розв'язання окреслених задач фотоенергетики є розробка та удосконалення технологій виробництва кремнієвих СЕ, здатних забезпечити рівень ККД, близький до 25%, сумісних з теперішнім технологічним процесом і мінімізованими капітальними витратами на його модернізацію. Найбільше відповідають цим вимогам такі розробки:

1. IBC SunPower – технологія з тильними бар’єрами і тильними точковими контактами на основі кремнію *n*-типу (Sun Power) [13, 14]. Технологія впроваджена у виробництво, кращі комерційні СЕ мають найвищий ККД серед промисловості до 22,7%, що наближається до реальної межі у 25-26%. У кращому СЕ площею 153,48 см² досягнуто значення ККД у 25,2%.
2. НІТ Panasonic/НІТ Kaneka. СЕ на основі гетеропереходів аморфний гідрогенізований кремній/кристалічний кремній. Відсутні високотемпературні процеси (дифузія, окиснення). Найвища температура у технологічному процесі – 300 °С. Лабораторні СЕ характеризуються рекордними значеннями ККД (25,6% до 2016 р. – Panasonic НІТ, модифікація СЕ з тильними бар’єрами 26,7% – НІТ Kaneka – найвище значення для кремнієвих СЕ) [15, 16].
3. Кремнієві СЕ PERC UNSW – технологія з пасивованими емітером та тильною поверхнею на основі кремнію *p*-типу. Перший лабораторний СЕ, де досягнуто значення ККД 25% (ще у 1996 р.) [17].
4. СЕ з пасивуванням електронних верхніх/тильних контактів на основі кремнію *n*-типу [18] (Fraunhofer ISE). Величина отриманого ККД лабораторних СЕ становить 25,8%.

Слід відзначити, що для кремнієвих СЕ з одним *p-n* переходом при використанні підкладок з більш дешевого мульткристалічного кремнію досягнуто значень ККД 22,3% (Fraunhofer ISE, рекорд) і 22,0% (Jinko solar, площа 245,83 см²) [12].

Разом із тим, не слід вважати, що кремнієва технологія навіть з ККД 25% є остаточним рішенням для фотоенергетики і що технології “наступного покоління” не з’являться на ринку протягом наступних 25 років. Для підвищення ефективності понад 25% потрібні технології нового покоління як для кремнієвої, так і для альтернативних технологій. Хоча декілька підходів теоретично дають вищу ефективність, ніж стандартні одноперехідні ФПСЕ, тільки один продемонстрував практичні досягнення, а саме каскадний (тандемний) підхід, рис. 5а, б. Суть цього підходу полягає у використанні послідовно розташованих СЕ з шириною забороненої зони, що зменшується у напрямку від верхнього до нижнього СЕ. При цьому зменшуються втрати на термалізацію вільних носіїв заряду, збуджених високоенергетичними короткохвильовими квантами світла, оскільки зменшується надлишок енергії вільних носіїв заряду над шириною забороненої зони (рис. 6).

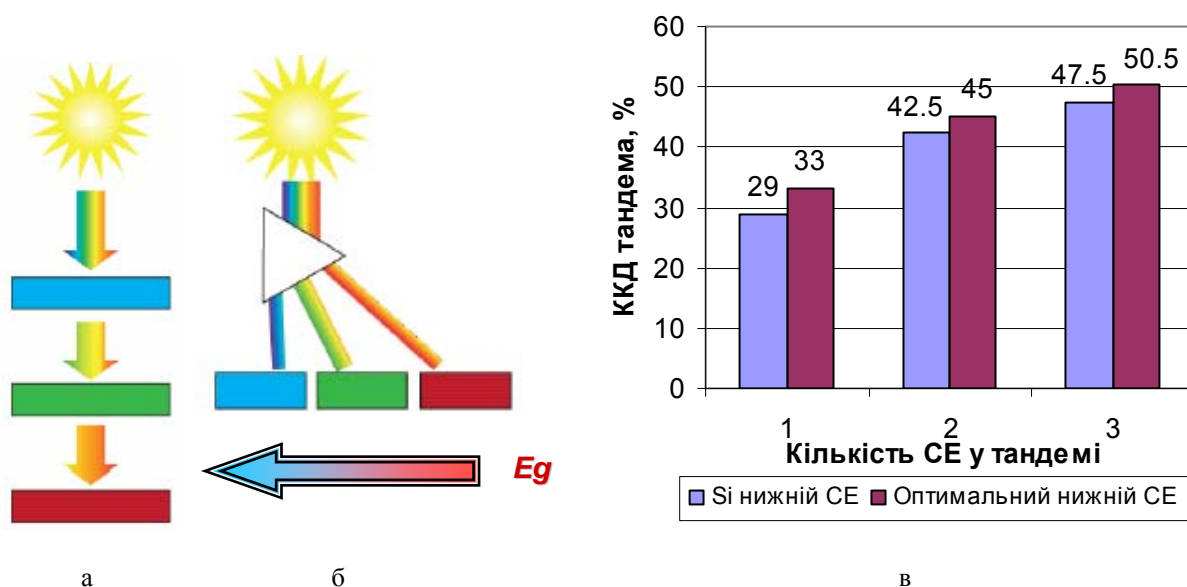


Рис. 5. Принцип дії каскадних (тандемних) СЕ з послідовним (а), паралельним (б) розташуванням СЕ і максимально досяжні ККД в залежності від кількості СЕ у каскаді (в).

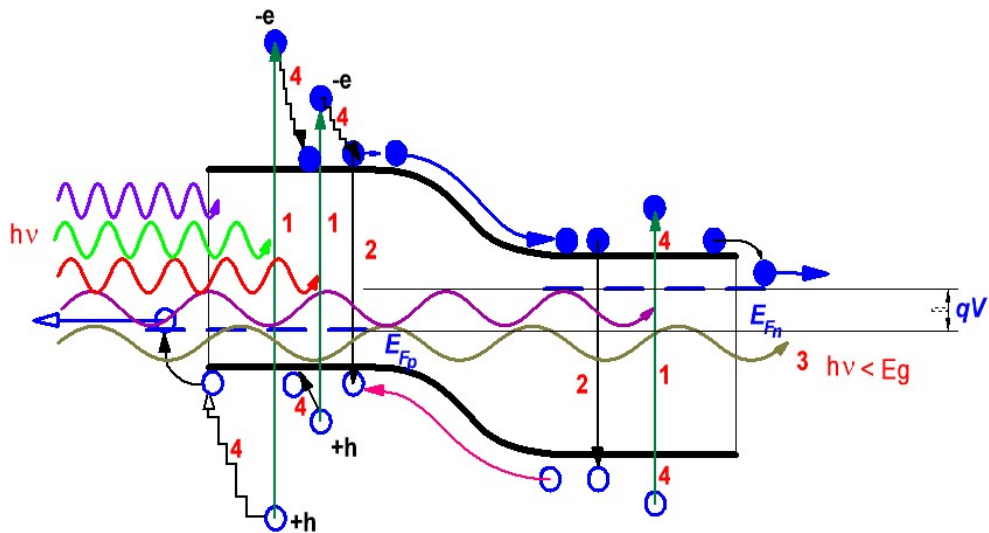


Рис. 6. Генерація носіїв заряду і основні види втрат в СЕ: 1 – генерація вільних електронно-діркових пар світлом з різною довжиною хвилі, 2 – рекомбінація електронно-діркових пар, 3 – втрати на пропускання, коли $h/\lambda = hv < E_g$, 4 – втрати надлишкової енергії при термалізації вільних носіїв заряду $h/\lambda = hv \gg E_g$.

Кремній може стати провідним кандидатом на роль нижнього СЕ – підкладки для таких тандемів, оскільки має наведені вище переваги і високий ККД, незважаючи на дещо завищену порівняно з оптимальною для тандемів ширину забороненої зони, що, однак, не призводить до суттєвого зменшення сумарного ККД, рис. 5в. Завдання дослідників полягає у розробці і використанні таких матеріалів (бажано тонкоплівкових), які дозволять наносити на кремнієвий СЕ один або, бажано, більше елементів, щоб підвищити ефективність, не погіршуючи міцність кремнієвого модуля.

Провідними кандидатами на роль верхніх широкозонних, високоефективних СЕ є прямозонні напівпровідникові сполуки A^3B^5 , зокрема AlGaAs, – з них можна формувати тонкоплівкові СЕ з різною шириною забороненої зони і високим ККД. Проблемою при використанні таких сполук на кремнієвих підкладках є неузгодженість сталої ґратки і виникнення внаслідок цього рекомбінаційних центрів на границі з кремнієм, через що на таких оптимізованих структурах отримано рекорд ККД у 19,7% [12]. Для розв'язання цієї проблеми застосовують різні підходи: осаджувати шари A^3B^5 не безпосередньо на кремній, а через узгоджувачий перехідний шар германію, який добре узгоджується з A^3B^5 [19], або виготовлювати окремо кремнієвий та арсенід-галієвий СЕ, а потім їх механічно зістикувувати [20]. Для механічно зістикованих СЕ на теперішній час отримано суттєві результати по ККД: 32,8% при використанні двоперехідних СЕ на основі GaInP/Si і 35,9% при використанні триперехідних СЕ на основі GaInP/GaAs/Si. Іншим оригінальним підходом є також виготовлення окремих СЕ на основі кремнію і двоперехідного на основі гетеропереходу GaInP/GaAs, а потім їхнього спікання при температурах до 350 °С з утворенням при цьому монолітного СЕ зі структурою GaInP/GaAs/Si [21]. Дослідники з ISE Fraunhofer (Німеччина) отримали на таких структурах з площею $\sim 4 \text{ см}^2$ ККД, що дорівнює 33,3% [12]. Однак, такі технології виготовлення тандемів A^3B^5 /Si ще далекі від промислового впровадження, оскільки осадження шарів A^3B^5 для створення тандема широкозонних СЕ здійснюється, як правило, методами молекулярно-пучкової епітаксії, а отже, вони є дорогими.

Тому увагу дослідників привертає можливість використання значно дешевших тонкоплівкових матеріалів, які можна наносити на поверхню кремнію дешевими і високопродуктивними методами, зокрема центрифугуванням (spin-coating) з наступним низькотемпературним відпалом. Останнім часом увага дослідників прикута до СЕ на основі органо-неорганічних халькогенідів металів зі структурою перовскітів, які описуються

формулою ABX_3 , де X ($X = F, Cl, Br, I$) є аніоном, а A та B – катіони різного розміру (A більший за B). Катіон A – це головним чином метиламоній ($CH_3NH_3^+$), а B – це Pb або Sn . Інтерес до цього класу матеріалів зумовлений тим, що вони характеризуються прямими оптичними міжзонними переходами, отже, мають високі значення коефіцієнта поглинання і їх можна наносити методом центрифугування. Крім того, за декілька років досліджень їх ефективність виросла до значень 20,9% для площі 1 см^2 і 22,7% для площі $0,09 \text{ см}^2$ [12]. Разом з тим, залишаються не розв'язаними ще задачі отримання значень ефективності більших за 20% на великих площах, покращення однорідності плівок, їх стабільності (перовскітні SE помітно деградують у часі), оптимізації технології їх виготовлення і т. ін., тому важливо продовжувати дослідження в цьому напрямку.

Дослідження у напрямку створення тандемних SE перовскіт/кремній дають обнадійливі результати, зокрема, повідомлялось [22] про отримання на монолітних двоперехідних тандемних SE перовскіт/кремній ККД 19,2% на площі $1,22 \text{ см}^2$ і 21,2% на площі $0,17 \text{ см}^2$, а для механічно зістикovanого тандема – 25,2%. Рекордне на сьогодні значення ККД на монолітному тандемі площею $\sim 1 \text{ см}^2$ дорівнює 23,6% [23].

Крім зазначених напрямів досліджень, зусилля науковців спрямовані також у таких напрямках:

- зменшення інтенсивності рекомбінаційних процесів;
- використання режимів концентрації сонячної енергії;
- використання ФПСЕ на основі тонких плівок та органічних сполук;
- збільшення ефективності фотоперетворення в короткохвильовій (down conversion) та довгохвильовій (up conversion) областях спектра;
- використання поверхневих (локалізованих) плазмонів – плазмонна фотовольтаїка та інші.

6. МОДЕЛЮВАННЯ ГРАНИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИСОКОЕФЕКТИВНИХ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Гранична ефективність фотоперетворення одноперехідного сонячного елемента обмежена шириною забороненої зони та неусувними механізмами рекомбінації, зокрема випромінювальної рекомбінації та міжзонної рекомбінації Оже. Зупинимось спочатку на висвітленні результатів моделювання граничної ефективності фотоперетворення одноперехідних кремнієвих SE η_m . Першою роботою в цьому напрямку була робота Шоклі–Квейзера [24]. В цій роботі величина η_m була знайдена з використанням умови детального балансу між випромінюванням та поглинанням, що відповідає врахуванню випромінювальної рекомбінації. Проте, крім випромінювальної рекомбінації, в кремнії існують такі неусувні втрати генерованих світлом електронно-діркових пар, як міжзонна рекомбінація Оже та поглинання на вільних носіях заряду. Протягом приблизно п'ятидесяти років уявлення про випромінювальну рекомбінацію, міжзонну рекомбінацію Оже та інші параметри кремнію вдосконалювалися, що привело до появи низки робіт, присвячених розрахунку величини η_m в різних наближеннях [25-29]. Серед істотних покращень, запропонованих при цих розрахунках, необхідно відзначити використання ламбертіана при знаходженні співвідношення між зовнішнім квантовим виходом фотоструму та коефіцієнтом поглинання [26], збільшення величини міжзонної рекомбінації Оже завдяки кулонівській взаємодії електронів та дірок [27, 30], вдосконалення механізму випромінювальної рекомбінації, пов'язаного з кулонівською взаємодією електронів та дірок [31] та ефекту звуження зон [32]. Зокрема, в роботі [26] була запропонована така гранична формула для спектральної залежності зовнішнього квантового виходу фотоструму $EQE(\lambda)$:

$$EQE_i(\lambda) = \left(1 + (4\alpha(\lambda) d n_r^2)^{-1}\right)^{-1}, \quad (1)$$

де $\alpha(\lambda)$ – коефіцієнт поглинання світла в залежності від довжини хвилі світла λ , d – товщина СЕ, n_r – коефіцієнт заломлення.

Строго кажучи, вираз (1) може реалізуватися, зокрема, у випадку текстурованих СЕ, поверхня яких рельєфна.

Найбільш досконалою по розрахунку граничної величини ефективності фотоперетворення в одноперехідних кремнієвих сонячних елементах є робота [28], в якій для умов освітлення AM1,5 G отримано значення η_m , що дорівнює 29,4% при товщині СЕ 110 мкм.

У роботі [33] було розраховано граничну ефективність фотоперетворення у перовскітному СЕ з шириною забороненої зони 1,55 еВ, а також граничну ефективність тандемного СЕ, який складається з перовскітного СЕ та СЕ на основі кремнію. Розрахунок було проведено з використанням наближення детального балансу між випромінюванням та поглинанням. У використаному наближенні величина ефективності фотоперетворення η_m перовскітного СЕ виявилася близькою до 33,7%, а значення η_m для тандемного СЕ – порядку 40%. У даній роботі були також розраховані ефективності фотоперетворення для перовскітного СЕ та для тандемного СЕ – перовскіт-кремній – з урахуванням відбивання світла від захисного скла та поглинання в шарі ІТО. Було враховано й інші втрати, зокрема, пов'язані з наявністю послідовного та шунтуючого опорів. Урахування всіх перерахованих втрат привело до зниження ефективності фотоперетворення перовскітного СЕ до 20,1%, а тандемного СЕ – до 30%.

7. МОДЕЛЮВАННЯ РЕАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИСОКОЕФЕКТИВНИХ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТА ПОРІВНЯННЯ З ЕКСПЕРИМЕНТОМ

Для початку необхідно відзначити, що підходи до теоретичного моделювання параметрів високоефективних кремнієвих сонячних елементів з p - n переходом та так званих НІТ елементів, в яких базою є кремній, а енергетичні бар'єри, необхідні для функціонування СЕ, створюються нанесенням легованих та нелегованих нанометрових шарів аморфного гідрогенізованого кремнію, при реальних температурах працюючих СЕ практично не відрізняються між собою.

Перш за все, необхідно теоретично змоделювати темнову ВАХ високоефективного СЕ. Як добре відомо, при низьких напругах V , прикладених в прямому напрямку, коли $V \leq 0,4$ В, темнова ВАХ кремнієвих СЕ в області достатньо високих температур $T \geq 300$ К визначається рекомбінацією електронно-діркових пар в області просторового заряду (ОПЗ), яка існує у виснажених областях кремнію. Як було показано в роботі [34], в кремнієвих СЕ час життя Шоклі-Ріда-Холла в ОПЗ суттєво менший за час життя в нейтральному об'ємі. Чинник неідеальності ВАХ за умови достатньо великого шунтуючого опору R_{sh} дорівнює 2. Проте при недостатньо великих значеннях R_{sh} , які характерні для НІТ елементів, він перевищує 2. Деякі дослідники це перевищення пов'язують з тунельною рекомбінацією в ОПЗ.

З огляду на те, що темнова ВАХ кремнієвих СЕ та НІТ елементів в області, коли $V > 0,4$ В, може суттєво відрізнятися від ВАХ ідеального діода Шоклі [35], що пов'язано з впливом тильної поверхні [36], це потрібно врахувати при аналізі залежностей темнових ВАХ сонячних елементів від прикладеної напруги. Тоді згідно з роботою [36] темнова ВАХ СЕ може бути записана у вигляді

$$I(V) = qA_{sc} \left(\frac{d}{\tau_b} + S + V_{sc}(V) \right) \Delta n(V) + \frac{V - I(V)R_s}{R_{sh}}, \quad (2)$$

де q – елементарний заряд, A_{SC} – площа СЕ, d – товщина пластини кремнію, τ_b – об’ємний час життя, $S = S_0 + S_d$ – сумарна швидкість поверхневої рекомбінації на поверхнях $x = 0$ і $x = d$,

$$V_{SC}(V) = \frac{1}{\tau_R} \int_0^w \frac{(N_d + \Delta n(V))}{\left[(N_d + \Delta n(V)) \exp \left[-y_{pn} \left(1 - \frac{x}{w} \right)^2 \right] + b \Delta n(V) \exp \left[y_{pn} \left(1 - \frac{x}{w} \right)^2 \right] \right]} dx - \quad (3)$$

швидкість рекомбінації в ОПЗ [34], τ_R – час життя Шоклі–Ріда–Холла в ОПЗ, w – товщина ОПЗ, N_d – концентрація основних носіїв заряду (для визначеності електронів) в нейтральному об’ємі кристалічного кремнію, $\Delta n(V)$ – надлишкова концентрація електронно-діркових пар в об’ємі кремнію, V – прикладена напруга, R_S – послідовний опір, R_{sh} – шунтуючий опір, $y_{pn} = 2 \ln(N_d / n_i(T)) - qV / kT$ ($n_i(T)$ – власна концентрація носіїв заряду в кремнії), k – постійна Больцмана, T – температура, $b = \sigma_p / \sigma_n$ – відношення перетинів захоплення дірок і електронів рекомбінаційним рівнем,

$$\tau_b = \left(\frac{1}{\tau_{SRH}} + \frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_{nr}} + \frac{1}{\tau_{Auger}} \right)^{-1}, \quad (4)$$

τ_{SRH} – час життя Шоклі–Ріда–Холла в об’ємі кремнію, $\tau_r = (A(n_0 + \Delta n(V)))^{-1}$ – час життя випромінювальної рекомбінації, A – параметр випромінювальної рекомбінації [37], $\tau_{nr} = \tau_{SRH} \cdot n_x / (n_0 + \Delta n(V))$ – час екситонної безвипромінювальної рекомбінації в кремнії [38], n_x – параметр безвипромінювальної екситонної рекомбінації в кристалічному кремнії, що дорівнює при кімнатній температурі $8,2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, τ_{Auger} – час життя міжзонної рекомбінації в кремнії, наведений в роботі [39].

Відзначимо, що вираз (1) справедливий, коли виконані наступні критерії: $L_d \gg d$, $S_d/D \ll 1$, де L_d та D – довжина та коефіцієнт дифузії неосновних носіїв заряду, L_d істотно перевищує товщину пластини кремнію d .

Згідно з роботою [36] з урахуванням впливу тильної поверхні вираз для $\Delta n(V)$ визначається формулою:

$$\Delta n(V) = \left[-\frac{n_0}{2} + \left(\left(\frac{n_0}{2} \right)^2 + n_i(T)^2 \exp \left(\frac{q(V - IR_s)}{kT} \right) \right)^{1/2} \right]. \quad (5)$$

Слід відмітити, що при виконанні критерію $\Delta n(V) \gg n_0$ чинник неідеальності ВАХ, як і у випадку малих значень V , коли домінує рекомбінація в ОПЗ, дорівнює 2, проте в даному випадку відхилення чинника неідеальності від 1 пов’язане з впливом тильної поверхні при реалізації високого рівня збудження.

Наведемо далі вирази для напруги розімкнутого кола V_{OC} і ефективності фотоперетворення η .

У даному випадку вираз для напруги розімкнутого кола V_{OC} має такий вигляд [2]:

$$V_{OC} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_d \Delta n_{OC}}{n_i(T)^2} \right) + \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_d + \Delta n_{OC}}{N_d} \right), \quad (6)$$

де надлишкова концентрація електронно-діркових пар в об'ємі кремнію в умовах розімкнутого кола (Δn_{oc}) визначається з рівняння балансу генерації-рекомбінації:

$$I_{sc} / q = A_{sc} \left[\frac{d}{\tau_b} + S \right] \Delta n_{oc}, \quad (7)$$

I_{sc} – струм короткого замикання.

Щоб розрахувати ефективність фотоперетворення η , необхідно отримати теоретичний вираз для ВАХ СЕ при наявності освітлення. Для цього узагальнимо вираз для $\Delta n(V)$ (4) на випадок, коли СЕ освітлюється і повний протікаючий струм I_L дорівнює:

$$I_L(V) = I_{sc} - I(V). \quad (8)$$

Тоді вираз для надлишкової концентрації електронно-діркових пар в об'ємі кремнію при освітленні буде визначатися виразом вигляду (5), якщо в ньому замінити I на I_L :

$$\Delta n_L(V) = -\frac{n_0}{2} + \sqrt{\frac{n_0^2}{4} + n_i^2 \left(\exp \frac{q(V - I_L R_s)}{kT} - 1 \right)}. \quad (9)$$

Шляхом використання рівнянь (8), (9) та умови максимуму потужності в зовнішньому колі $d(VI_L(V))/dV = 0$ визначається величина фотонапруги в точці відбору максимальної потужності V_m , а його підстановка в (8) дозволяє визначити величину фотоструму I_m в цій точці. В результаті отримуємо для максимальної потужності фотоперетворення СЕ P такий вираз:

$$P = I_m V_m. \quad (10)$$

Чинник заповнення ВАХ FF , як звичайно, дорівнює

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}}. \quad (11)$$

Ефективність фотоперетворення η визначається формулою

$$\eta = \frac{I_m V_m}{A_{sc} P_s}, \quad (12)$$

де P_s – густина потужності падаючого сонячного випромінювання.

Для того, щоб остаточно змоделювати основні характеристики вискоефективних кремнієвих СЕ чи НІТ елементів (зокрема, в умовах АМ1,5 G), потрібно ще використати зв'язок між густиною струму короткого замикання J_{sc} та зовнішнім квантовим виходом фотоструму $EQE(\lambda)$, який задається співвідношенням

$$J_{sc} = q \int_{\lambda_0}^{\lambda_m} I_{AM1,5}(\lambda) EQE(\lambda) d\lambda, \quad (13)$$

де λ_0 – короткохвильовий край поглинання, $\lambda_m = 1200$ нм, $I_{AM1,5}(\lambda)$ – спектральна густина потоку фотонів при реалізації стандартних умов АМ 1,5.

Відзначимо, що найбільші ефективності фотоперетворення η досягнуті в текстурованих кремнієвих СЕ та НІТ елементах. Як уже говорилося у попередньому підрозділі, зовнішній квантовий вихід фотоструму в текстурованих СЕ в ідеальному випадку описується формулою (1). Як показав аналіз, виконаний у роботі [41], для реальних високоефективних текстурованих кремнієвих СЕ та НІТ елементів це не відповідає дійсності. Зокрема, навіть у випадку, коли паразитні втрати на поглинання та відбивання поза межами кремнію відсутні, зовнішній квантовий вихід текстурованих кремнієвих СЕ та НІТ елементів описується формулою:

$$EQE^*(\lambda) = \left(1 + \left(\alpha(\lambda)l_{ph}(d, b)\right)^{-1}\right)^{-1}, \quad (14)$$

де $l_{ph}(d, b) = [4n_r^2 b^{-1}]d$ – довжина пробігу фотона в напівпровіднику, а b – варіюваний параметр.

Цей вираз переходить в формулу (1) у випадку, коли $b = 1$.

У випадку нетекстурованих кремнієвих СЕ з дзеркальною тильною поверхнею зовнішній квантовий вихід при відсутності паразитних втрат має вигляд:

$$EQE_m = 1 - \exp(-2\alpha(\lambda)d). \quad (15)$$

Слід відзначити, що критерій високого рівня збудження $\Delta n(V) \gg n_0$ реалізується уже в умовах АМ1,5, коли $n_0 \sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$, а $\tau_{SRH} \sim 10^{-3} \text{ с}$. У цьому випадку чинник неідеальності ВАХ ~ 2 , а значення напруги розімкненого кола та ефективності фотоперетворення зростають, що пов'язане з впливом ізотипного бар'єра на тильній поверхні.

Викладемо далі основні результати, отримані в роботі [41]. У даній роботі наведено та детально проаналізовано експериментальні залежності $EQE(\lambda)$ для текстурованих НІТ елементів, отримані в [15], виміряні в роботі [41] для елементів з товщиною 160 мкм, отримані для рекордних елементів в [16], наведені в [18] для рекордних кремнієвих СЕ з $p-n$ переходом і отримані в [17] для кремнієвих СЕ з переходом.

На рис. 7 для прикладу наведено експериментальні залежності $EQE(\lambda)$ для текстурованих НІТ елементів, отримані в [15]. Розрахункові залежності для внутрішнього квантового виходу фотоструму $IQE(\lambda)$ описуються формулою (14). Величина $\alpha(\lambda)$ взята з роботи [42]. Значення товщини, фотоенергетичних параметрів, об'ємні часи життя і рівень легування наведено в таблиці.

Таблиця. Параметри текстурованих СЕ на основі кремнію.

Зразок	d , мкм	τ_{SRH} , мс	S_0 , см/с	J_{SC} , мА/см ²	V_{OC} , В	FF , %	η_{exp} , %	n_0 , см ⁻³	b	l_{ph} , мм	d_{opt} , мкм
№ 1 [14]	98	12	1,4	39,5	0.750	83,2	24,7	$5 \cdot 10^{15}$	1,6	2,95	100
№ 2 [40]	160	3	1	36	0.721	78,6	20,4	$1 \cdot 10^{15}$	5	1,51	160
№ 3 [15]	200	16	0,585	42,65	0.738	84,9	26,7	$6,5 \cdot 10^{14}$	2	4,68	160
№ 4 [17]	200	9	6	42,5	0.725	83,3	25,7	$5 \cdot 10^{15}$	2	4,68	210
№ 5 [16]	450	3	5,7	42	0.696	83,6	24,4	$2 \cdot 10^{15}$	12	1,76	470

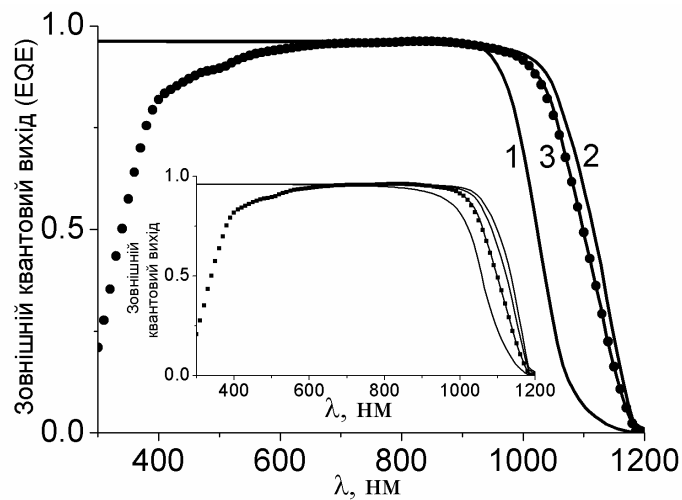


Рис. 7. Експериментальні залежності для зовнішнього квантового виходу $EQE(\lambda)$ СЕ, взяті з роботи [14]. На вставці до рис. 7 наведено розрахункові залежності $IQE(\lambda)$ для низки товщин (зліва направо $d = 30, 100, 200$ та 300 мкм). Інші параметри взяті з першого рядка таблиці. Теоретичні залежності внутрішнього квантового виходу $IQE(\lambda)$ (криві 1-3) розраховані за формулами (15), (11) та (14). Теоретичні криві нормовані на максимальне значення EQE . При розрахунку використано значення $b = 1,6$.

Варіюючи b , можна досягти гарного узгодження (14) з експериментом, наведеним на рис. 7 (див. криві 1-3). Величини l_{ph} згідно з розрахунком для СЕ з товщиною 98, 160, 200 [16], 200 [18] і 450 мкм [17] відповідно дорівнюють 2,95; 1,51; 4,68; 4,68 і 1,76 мм. Чим більша величина l_{ph} , тим ближча величина $EQE(\lambda)$ до значення, що описується формулою (1). Однак, як видно з наведених значень l_{ph} , у текстурованих СЕ на основі кремнію величини l_{ph} не досягають граничного значення, що дорівнює $4n_r2d$. Крім проаналізованих вище, є й інші роботи (див., наприклад, [42-45]), що підтверджують цей висновок.

Відзначимо, що величини EQE при зміні товщини СЕ змінюються лише в області великих значень λ (див. вставку на рис. 7). З неї видно, що при $300 < \lambda < 750$ нм значення EQE не залежить від товщини СЕ. Аналогічні результати справедливі і для залежностей EQE інших проаналізованих нами зразків СЕ. Тому при розрахунку $I_{SC}(d)$ інтеграл в (13) можна розбити на дві частини, інтегруючи від 300 до 750 нм і від 750 до 1200 нм. У першому інтегралі використовуються експериментальні значення EQE , а в другому – формула (14). Знайдені таким чином розрахункові залежності $I_{SC}(d)$ наведено на рис. 8.

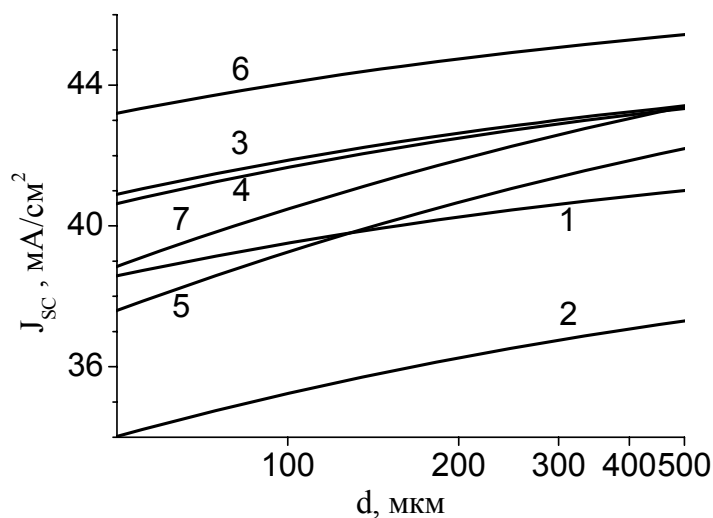


Рис. 8. Теоретичні залежності густини струму короткого замикання від товщини, побудовані з використанням параметрів, наведених у таблиці. Нумерація кривих у відповідності з таблицею. Крива 6 побудована з використанням формули Яблоновича (3), а крива 7 – з використанням формули (2).

Як видно з рис. 8, швидкість росту залежностей $I_{SC}(d)$ для кривих 1, 3 і 4 близька до межі, що описується формулою (1) (див. криву б). Швидкості росту $I_{SC}(d)$ корелюють з величинами $l_{ph}(d, b)$. Чим більше значення $l_{ph}(d, b)$, тим ближчі нахили залежностей $I_{SC}(d)$ до межі Яблоновича.

Розглянемо питання про співвідношення внесків в $I_{SC}(d)$, пов'язаних із зсувом залежності $EQE(\lambda)$ у довгохвильовий бік (ΔI_{SC1}) і зі зменшенням r_s у текстурованих СЕ (ΔI_{SC2}). Використовуючи (13) та значення $EQE(\lambda)$, $IQE(\lambda)$, наведені на рис. 7 і 8, можна оцінити величину ΔI_{SC1} . Вона становить 7,5% для $d = 98$ мкм, 2,8% для $d = 160$ мкм, 5,8% для $d = 200$ мкм [16], 5,78% для $d = 200$ мкм [18] і 0,7% для $d = 450$ мкм. Величина ΔI_{SC2} може бути знайдена з урахуванням формули Френеля. Для кремнію величина r_s близька до 30%. Врахування цього приводить до зростання I_{SC} на 41% для [15-18] і на 38% для [42].

Для розрахунку $\eta(d)$ скористаємося виразами (4), (6)-(14). Слід зазначити, що вони залежать не тільки від рівня легування $N_d \approx n_0$, але і від величини надлишкової концентрації електронно-діркових пар Δn . Залежність $S(\Delta n)$ згідно з [47] має вигляд:

$$S = S_0 (1 + \Delta n / n_0). \quad (16)$$

Використовуючи вираз для η (12), вираз для S (16) і розраховуючи $I_{SC}(d)$ з урахуванням залежностей $EQE(\lambda)$ і формули (14), отримуємо розрахункові криві $\eta(d)$, наведені на рис. 9. Значення для S_0 і d_{opt} досліджуваних СЕ наведено в таблиці. На величину d_{opt} впливає як швидкість росту $J_{SC}(d)$, так і значення S_0 . Як видно з таблиці, значення d і d_{opt} для зразків СЕ №1 і №2 збіглися, а різниця між товщиною СЕ і величинами d_{opt} для зразків СЕ №3, №4 та №5 невелика.

Експериментальні значення для рівнів збудження в умовах розімкнутого кола і максимальної потужності, що віддається у зовнішнє коло, наведені в [21] і [22], збігаються з розрахунковими. Це додаткове підтвердження правильності використаної теорії.

Відзначимо, що в роботі [18], крім експериментальних кривих, наведено результати чисельного моделювання за допомогою програми [48]. Виходячи із залежностей, наведених на рис. 6 цієї роботи, в ній закладена формула виду (1). Як показано вище, вираз (1) в текстурованих СЕ на основі кремнію не реалізується. Тому при використанні [48] потрібно враховувати результати, описані вище.

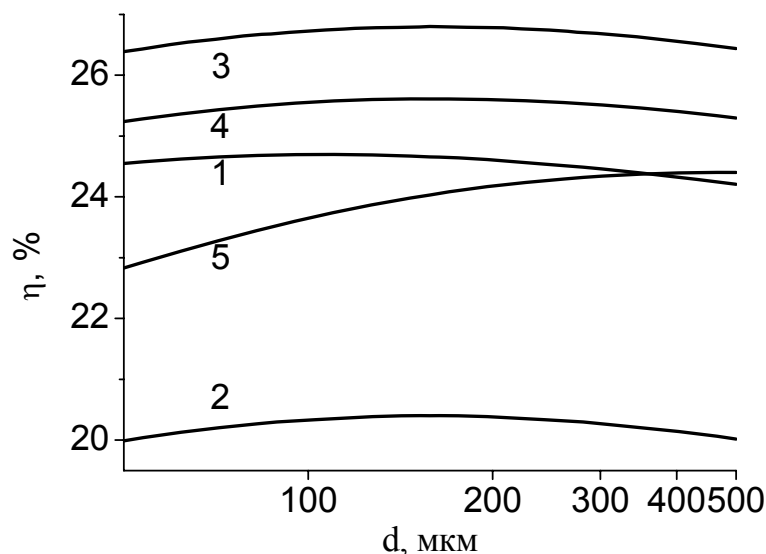


Рис. 9. Теоретичні залежності ефективності фотоперетворення від товщини, побудовані з використанням параметрів, наведених у таблиці. Нумерація кривих у відповідності з таблицею.

Підсумуємо результати, отримані в роботі [40]: 1) запропонована апроксимаційна формула для розрахунку внутрішнього квантового виходу, яка враховує, що в текстурованих СЕ на основі кремнію довжини пробігу фотонів не досягають граничного значення $4n_r 2d$; 2) показано, що вона добре описує залежності $EQE(\lambda)$ у довгохвильовій області; 3) її використання, а також використання підходу, розвинутого в роботах [49, 50], дозволяє коректно проводити оптимізацію параметрів високоефективних текстурованих СЕ на основі кремнію, в тому числі і з ефективністю $\geq 25\%$, що проілюстровано на прикладі знаходження величини d_{opt} в таблиці.

Як показали результати досліджень, висвітлених в роботах [50, 51], у перовскітах зовнішній квантовий вихід струму короткого замикання в спектральній області біля краю поглинання також описується виразом (14) (див. рис. 10), хоча структури перовскітів не є текстурованими. З порівняння експериментальних та розрахункових залежностей видно, що експериментальні значення узгоджуються з розрахунком, виконаним за формулою (1), при $EQE < 0,4$ (крива 1). У той же час узгодження між експериментом та теорією при використанні трансформованої формули (14) (якщо покласти величину b , яка дорівнює 3) має місце не лише в околі краю поглинання, а й до значень $EQE \sim 0,9$ (крива 2).

На рис. 11 наведено мікроструктуру плівок перовскіту $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{2,98}\text{Cl}_{0,02}$ [51]. Морфологія плівки може бути описана як сітка на основі неорієнтованих голкоподібних структур з високим співвідношенням сторін із значною шорсткістю плівки та пористістю. Це означає, що плівка перовскіту може розглядатися як природно текстурована чи профільована.

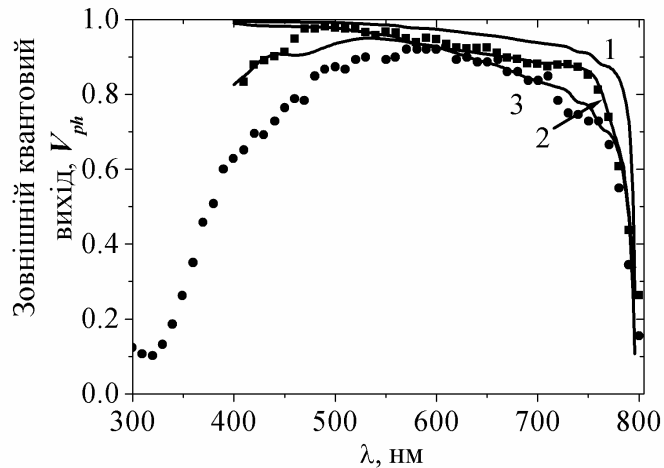


Рис. 10. Експериментальні (точки) та теоретичні залежності (криві 1 та 2) для EQE для СЕ на основі FAPbI_3 і крива 3 для $V_{ph}(\lambda)$ плівки $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{2,98}\text{Cl}_{0,02}$. Використані параметри: 1 – $d = 560$ нм, $b = 1$; 2 – $d = 560$ нм, $b = 3$; 3 – $D_1 = 2,5 \cdot 10^{-2}$ см²/с, $L_1 = 2,4 \cdot 10^{-6}$ см, $S_0 = 10^6$ см/с, $d_1 = 100$ нм, $d = 400$ нм, $b = 4$.

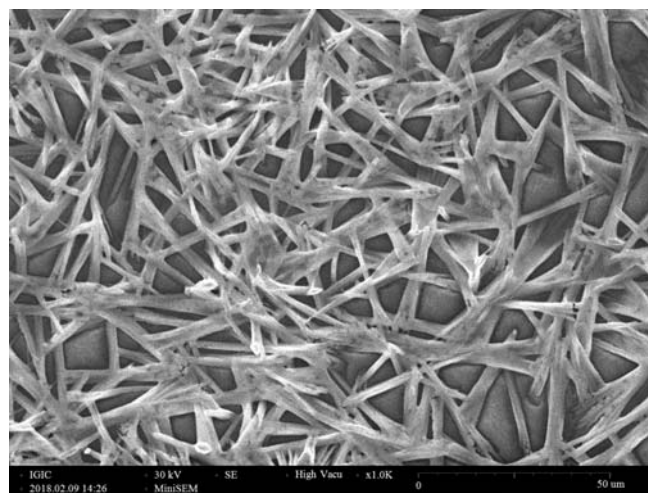


Рис. 11. Мікроструктура плівок $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{2,98}\text{Cl}_{0,02}$ після термічної обробки при 90°C .

Відзначимо, що в СЕ на основі перовскітів база спеціально не легується, тому ВАХ для них потрібно розраховувати як для *p-i-n* структури. Тому в них, як і в НІТ елементах, реалізується високий рівень збудження в умовах АМ1,5 [51].

Викладемо далі результати розрахунку реальних величин ефективності фотоперетворення в тандемних сонячних елементах, які складаються з СЕ на основі перовскіту та НІТ, отримані в [52].

У роботі [53] була розрахована ефективність фотоперетворення тандемного сонячного елемента, однією зі складових якого був НІТ елемент, а іншою складовою – гіпотетичний широкозонний сонячний елемент, створений на основі прямозонного напівпровідника. Будемо далі вважати, що гіпотетичним широкозонним сонячним елементом є *p-i-n* структура на основі перовскіту. Формула для ефективності такого тандемного сонячного елемента з узагальненням на випадок не рівного нулю послідовного опору R_s в умовах АМ1,5 має такий вигляд:

$$\eta = \frac{J_{sc}V_{oc}}{P_s} \left(1 - \frac{0.0257m}{V_{oc}} \right) \left(1 - \frac{0.0257m}{V_{oc}} \ln \left(\frac{V_{oc}}{0.0257} \right) \right) \left(1 - \frac{A_{sc}J_{sc}R_s}{V_{oc}} \right), \quad (17)$$

де J_{sc} – густина струму короткого замикання тандемного СЕ, $V_{oc} = V_{oc1} + V_{oc2}$, $m = m_1 + m_2$ – напруга розімкнутого кола і коефіцієнт неідеальності ВАХ тандемного СЕ в цілому, $R_s = R_{s1} + R_{s2}$, $P_s = 0,1$ Вт/см², A_{sc} – площа тандемного СЕ.

Спочатку розглянемо випадок, коли структура створена на основі перовскіту FAPbI з параметрами, наведеними в роботі [54]. В роботі [52] було запропоновано теоретичний підхід до опису характеристик зазначеної структури. Зокрема, було показано, що коефіцієнт неідеальності ВАХ структури на основі FAPbI m_1 дорівнює 2, величина V_{oc1} дорівнює 1,04 В, а величина R_{s1} – 4,5 Ом. У даному випадку значення напруги розімкнутого кола, коефіцієнта неідеальності ВАХ і послідовного опору, необхідні для визначення ефективності фотоперетворення тандемного СЕ, можна отримати, використовуючи літературні дані на основі аналогічних характеристик НІТ елементів. Так, зокрема, на підставі роботи [44] для рекордного за ефективністю НІТ елемента величини m_2 , V_{oc2} і R_{s2} відповідно дорівнюють 1,25; 0,75 В і 0,01 Ом. Сумарні значення в даному випадку відповідно дорівнюють 3,25; 1,79 В і 4,51 Ом. У граничному випадку, коли величина R_s дорівнює нулю, отримуємо такий набір параметрів: 3,25; 1,79 В і 0 Ом. Згідно з роботою [49] для НІТ елемента з ефективністю фотоперетворення 20% значення m_2 , V_{oc2} і R_{s2} дорівнюють 1,9; 0,7 В і 0,16 Ом. При цьому їх сумарні значення становлять 3,9; 1,74 В і 4,66 Ом.

Величини струму короткого замикання в ідеально узгоджених складових монолітного тандемного СЕ повинні бути однаковими. У випадку, коли вони не однакові, в колі буде протікати менший струм. Максимальне значення густини струму короткого замикання у НІТ елементах згідно з роботою [44] становить близько 40 мА/см². Поділивши його на два, отримуємо 20 мА/см². Це максимальне значення протікаючого в тандемному СЕ струму. Найменше значення густини протікаючого струму покладемо рівним 16 мА/см². Тоді за формулою (17) можна розрахувати залежність ефективності фотоперетворення тандемного СЕ від струму, що протікає. Підставляючи в цю формулу два набори параметрів m , V_{oc} і R_s , представлені вище, отримуємо криві 3 і 5 (див. рис. 12). Як видно з рисунку, мінімальні значення ефективності фотоперетворення становлять близько 21, а максимальні – понад 29%. Максимальні величини (див. криву 1) отримуються для набору параметрів 3,25; 1,79 В і 0 Ом.

На рис. 13 наведено розрахункові залежності ефективності фотоперетворення тандемного СЕ від струму, що протікає, варіюваним параметром яких є послідовний опір R_s . Всі криві побудовані для випадку, коли сумарні значення m та V_{oc} дорівнюють 3,9 і 1,74 В. Порівнюючи між собою рис. 12 і 13, можна побачити, що зміна значень m і V_{oc} може привести до більшої зміни ефективності фотоперетворення, ніж зміна величини R_s .

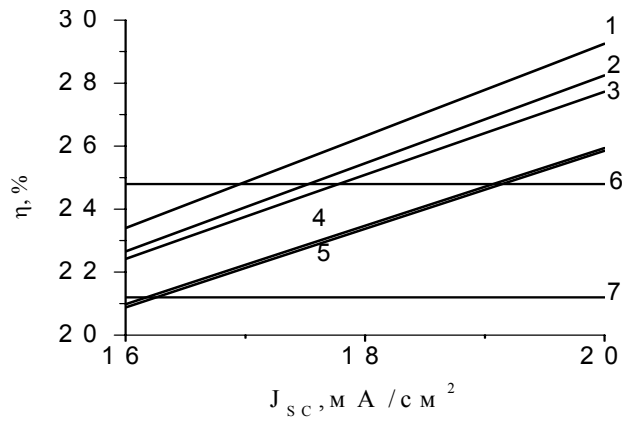


Рис. 12. Залежності ефективності фотоперетворення тандемного елемента від густини струму короткого замикання. Пояснення в тексті. Горизонтальні лінії 6 і 7 відповідають значенням ефективності фотоперетворення 25 і 21%.

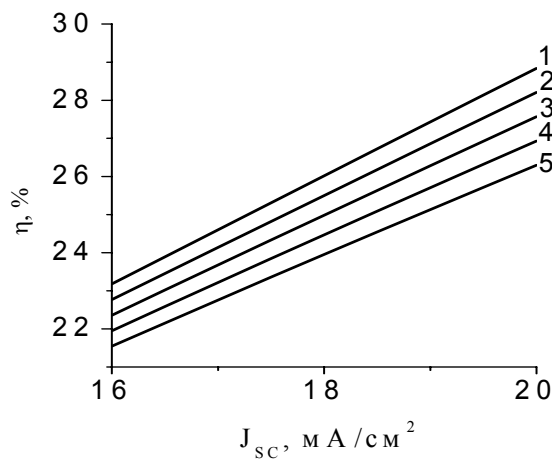


Рис. 13. Залежності ефективності фотоперетворення тандемного елемента від густини струму короткого замикання. Використані значення R_s , Ом: 2 (1), 4 (2), 6 (3), 8 (4), 10 (5).

8. ДОСЛІДЖЕННЯ В ГАЛУЗІ ФОТОЕНЕРГЕТИКИ В ІФН НАНУ

Зупинимось на розробках у галузі фотоенергетики Інституту фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова Національної Академії наук (ІФН ім. В.Є. Лашкарьова НАН України) за останні 15 років.

- Розроблено і виготовлено кремнієві СБ для космічних апаратів нового покоління класу „Мікросупутник” на основі оригінальної розробки – СЕ з комбінованими дифузійно-польовими бар’єрами.
- Розроблено дослідні зразки кремнієвих СБ для живлення переносної дозиметричної апаратури.
- Розроблено і виготовлено експериментальні зразки СЕ нового типу з тильними бар’єрами і контактною металізацією для використання при концентрованому сонячному освітленні.
- Проведено теоретичне моделювання ККД біля 10 різновидів СЕ.
- Розроблено мобільні фотоелектричні та комбіновані фотоелектричні / вітрові електростанції для автономного електропостачання електронного обладнання в екстремальних умовах.
- Створено та атестовано Держстандартом Центр випробувань фотоперетворювачів і фотоелектричних батарей – об’єкт національного надбання.

Використання кремнієвих СЕ з комбінованими дифузійно-польовими бар'єрами [56-59] дозволяє поєднати переваги дифузійних і інверсійних СЕ і позбутися при цьому властивих їм недоліків. Цей тип СЕ базується на використанні комбінованого індуковано-дифузійного способу формування роздільних бар'єрів у кремнієвих багатофазних структурах типу ДН чи МДН. При цьому дифузійно-польові бар'єри створюються як за допомогою дифузії мілких легуючих домішок, так і завдяки заряду, який присутній у шарі двоокису кремнію, нанесеному на поверхню дифузійного шару. Відносно невисокий рівень легування емітерної області у СЕ з дифузійно-польовими бар'єрами забезпечує істотно нижчий рівень рекомбінаційних втрат в емітерній області таких структур порівняно з дифузійними СЕ і в той же час дозволяє істотно зменшити опір приповерхневого шару, а існування польового бар'єра значно зменшує швидкість поверхневої рекомбінації на межі поділу ДН, рис. 14. В спектральних умовах АМ0 розроблені СЕ характеризувались густиною струму короткого замикання $J_{SC} = 38...44,5 \text{ мА/см}^2$, напругою розімкненого кола $V_{OC} = 0,635...0,645 \text{ В}$, коефіцієнтом заповнення ВАХ $FF = 0,795...0,805$, питомою вихідною електричною потужністю $P_e = 215...220 \text{ Вт/м}^2$. В умовах АМ1,5 їх ККД досягав 20%.

На основі кремнієвих СЕ з комбінованими дифузійно-польовими бар'єрами в рамках Національної космічної програми України ІФН ім. В.Є. Лашкарьова НАН України за технічним завданням Державного конструкторського бюро "Південне" виконав ДКР з розробки та виготовлення комплекту СБ [56-59], призначеного для використання в системі енергопостачання КА КС5МФ2 "Мікрон" як первинного джерела енергії (збирання батарей здійснювалось в СКТБ з ДВ ІФН ім. В.Є. Лашкарьова НАН України), рис. 15. Ці СБ призначені для роботи в умовах невагомості та космічного вакуума на навколосезних орбітах висотою 500-700 км і характеризуються стійкістю до дії факторів космічного простору, зокрема, витримують циклічні зміни температури від плюс 75°C до мінус 85°C , іонізуючі випромінювання природних радіаційних поясів Землі, періодичні затінення робочої поверхні СБ елементами конструкції КА, УФ сонячне випромінювання. За замовленням ВО "Південмаш" виготовлений льотний комплект (4 СБ) сонячних батарей нового покоління на основі СЕ з комбінованими дифузійно-польовими бар'єрами космічного призначення, успішно пройшов повний цикл приймально-здавальних і автономних випробувань, він був встановлений на КА КС5МФ2 "Мікрон", який успішно запущений на орбіту навколо Землі у грудні 2004 р.

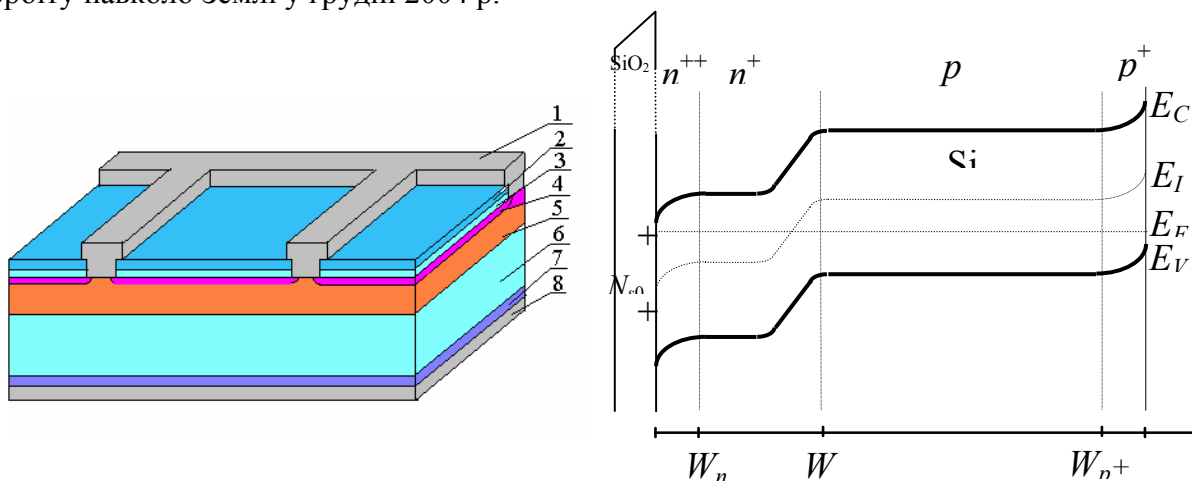


Рис. 14. Конструкція кремнієвого дифузійно-польового СЕ з базою p -типу і його зонна діаграма: 1 – фронтальний металевий гребінчастий електрод (Al); 2 – просвітлюючий шар нітриду кремнію товщиною 40-50 нм; 3 – заряджений діелектричний шар SiO_2 товщиною до 30 нм; 4 – індукований n^{++} -шар; 5 – дифузійний n^+ -шар; 6 – квазінейтральна базова область (p -Si); 7 – дифузійний p^+ -шар – антирекомбінаційний ізотипний перехід на тильній поверхні; 8 – тильна металізація (Al); W_n і W_p^+ – товщини індукованого n^{++} - і дифузійного тильного p^+ -шарів; W_p^+ - W і d – товщини квазінейтральної бази і СЕ відповідно.

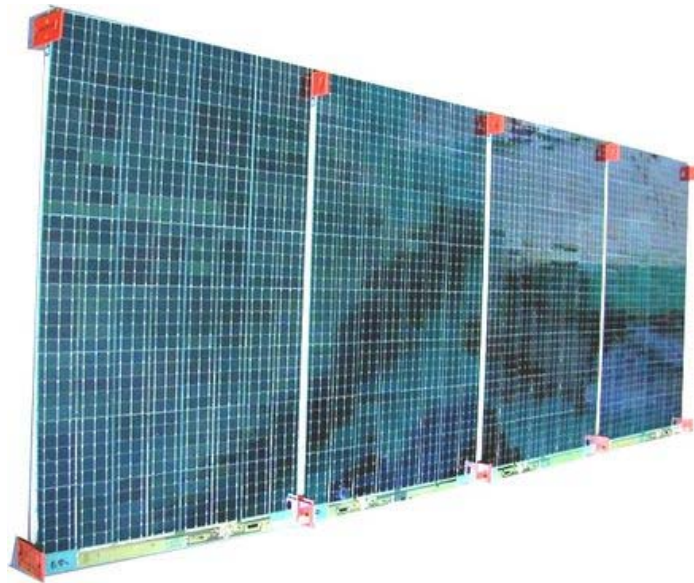


Рис. 15. Комплект фотоелектричних батарей для енергозабезпечення космічних апаратів нового покоління класу мікросупутник КС5МФ2 “Мікрон”, розроблених ДКБ “Південне”.

Розроблено мобільні фотоелектричні електростанції з піковою потужністю 20-40 Вт та комбіновані фотоелектричні/вітрові електростанції з піковою потужністю 80 Вт для автономного електропостачання електронного обладнання в екстремальних (польових) умовах, рис. 16. Фотоелектрична/вітрова електростанція являє собою компактну конструкцію, пристосовану для перенесення, яку можуть використовувати військовослужбовці, співробітники МВС, МНС та інші. Розробка захищена патентом України № 105847 та успішно випробувана у польових умовах на Сході України, про що свідчать позитивні відгуки [60, 61].



Рис. 16. Мобільна сонячна і комбінована сонячно/вітрова електростанція, призначена для використання у польових (екстремальних) умовах потужністю 20 - 80 Вт.

Вперше в Україні розроблені, виготовлені і досліджені експериментальні зразки кремнієвих ФП нового типу з тильним розміщенням бар'єрів та зустрічно-штирьовою контактною металізацією [62, 63], які характеризуються мінімізованими поверхневими втратами і розширеним діапазоном лінійності люкс-амперної характеристики, рис. 17. Розроблені ФП призначено для використання як датчики енергетичної освітленості в контрольно-вимірювальному устаткуванні для фотоенергетичних випробувань СЕ і батарей наземного і космічного призначення при концентрованих потоках сонячного випромінювання.

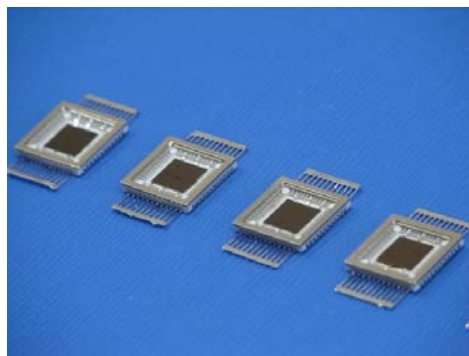
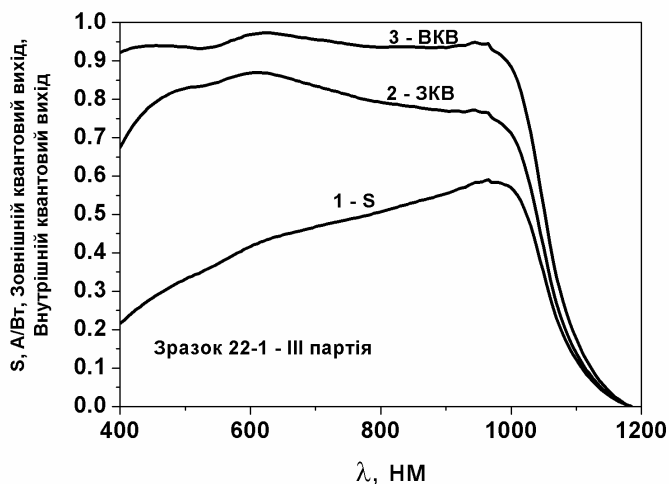


Рис. 17. Спектральна залежність фоточутливості S , зовнішнього EQE і внутрішнього IQE квантового виходу (а) та експериментальні зразки кремнієвого фотоприймача з тильним розміщенням бар'єрів і струмозбираючих контактів. Просвітлення шаром SiO_2 товщиною 110 нм.



Рис. 18. Стендова база ЦЕНТРУ ВИПРОБУВАНЬ ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ І ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ БАТАРЕЙ для електричних і фототехнічних випробувань БФ космічних апаратів.

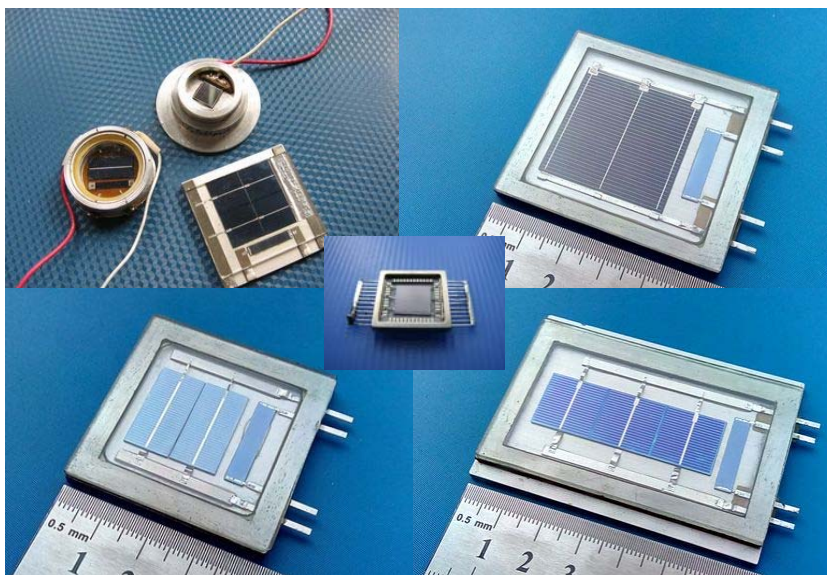


Рис. 19. Зразкові (еталонні) засоби ЦЕНТРУ ВИПРОБУВАНЬ ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ І ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ БАТАРЕЙ.

Для метрологічного забезпечення робіт в галузі фотоенергетики в ІФН ім. В.Є. Лашкарьова НАН України був створений єдиний в Україні атестований органами ДЕРЖСПОЖИВСТАНДАРТУ [64, 65] відповідно до вимог Правил уповноваження та атестації в державній метрологічній системі ЦЕНТР ВИПРОБУВАНЬ ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ І ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ БАТАРЕЙ. Основою Центру є комплекс сертифікації ФП, фотоелектричних модулів і сонячних батарей, в склад якого входять три автоматизовані вимірювальні установки: установка для визначення спектральної характеристики фотоперетворювачів (УВВСХ), установка фототехнічних випробувань СФП (УФВ) та установка для електричних і фототехнічних випробувань СБ (УЕФВ), рис. 18. Всі установки і зразкові (еталонні) засоби (рис. 19) ЦЕНТРУ ВИПРОБУВАНЬ розроблено у відділі фізико-технічних основ напівпровідникової фотоенергетики ІФН ім. В.Є. Лашкарьова НАН України. У 2013 році ЦЕНТР ВИПРОБУВАНЬ ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ І ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ БАТАРЕЙ внесено до реєстру наукових об'єктів, що становлять національне надбання.

9. ВИСНОВКИ

Описано сучасний стан досліджень у напівпровідниковій фотоенергетиці. Наведено рекордні значення ККД фотоелектричних перетворювачів сонячної енергії (ФПСЕ) на основі різних матеріалів. Детально викладено механізми генераційно-рекомбінаційних процесів і струмопроходження в ФПСЕ на основі *p-n* переходів, а також гетеропереходів аморфний кремній/кристалічний кремній (НІТ елементи) як для граничного випадку, коли усуненими механізмами рекомбінації можна знехтувати, так і для реального випадку, коли враховуються усі можливі рекомбінаційні механізми. Сконцентровано увагу на особливостях цих механізмів у випадку порівняно невеликих рівнів легування кремнію ($\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$) та великих часів життя нерівноважних носіїв заряду ($\sim 10^{-3} \text{ с}$). При цьому уже в умовах АМ1,5, коли потужність сонячного освітлення становить 1000 Вт/см^2 , в кремнієвих СЕ та НІТ елементах реалізується високий рівень збудження. Це приводить до зростання чинника неідеальності ВАХ, фотонапруги та ККД, яке пов'язане з впливом ізотипного бар'єра на тильній поверхні.

Детально проаналізовано спектральні залежності зовнішнього квантового виходу струму короткого замикання EQE . Показано, що у високоефективних текстурованих СЕ на основі кремнію довжина пробігу фотонів зростає порівняно з випадком плоскопаралельних структур, що приводить до зростання EQE , але це зростання не таке велике, як вважалось в роботі [26]. Аналогічні результати мають місце і для СЕ на основі перовскітів. У цьому випадку спеціальне текстурування відсутнє, але, як показано, перовскіти являють собою сітку голкоподібних структур, тобто їх можна розглядати як природно текстуровані чи профільовані.

Наведено огляд результатів робіт з розробки фізичних і фізико-технологічних засад створення високоефективних ФПСЕ космічного та наземного призначення, виконаних в Інституті фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України.

Kostylyov V.P., Sachenko A.V.

Semiconductor photovoltaics: current state and actual directions of research

Recently, the work to improve the efficiency of solar energy photoconverters (SEPCs) has been continued, due to which the achieved efficiency values in the SEPC based on silicon are closely approached to their limit ones. Active researches in the field of semiconductor energy converters are being performed at the V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics, National Academy of Sciences of Ukraine. Therefore, this review outlines the up-to-date state of researches in semiconductor photovoltaics. From the analysis of the distribution of the photovoltaics market, it has been concluded that the silicon technology will dominate in the next 10 to 15 years. The record values of the efficiency of SEPCs based on various materials are adduced.

The features of the generation and recombination processes as well as the current passage in the SEPC based on both $p-n$ - junctions and amorphous silicon / crystalline silicon (α -Si: H/c-Si) heterojunctions, in a wide range of excitation level changes are analyzed both for the limiting case, when the removable recombination mechanisms can be neglected, and for the real case, when all available recombination mechanisms are taken into account.

It has been shown that, in the case of large lifetimes of non-equilibrium charge carriers and doping level of $\sim 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ already in the AM1,5 (1000 W/cm²) conditions in the silicon SEPCs, a high excitation level is realized. When increasing the applied voltage, at $0.5 \text{ V} < 0.7 \text{ V}$, the value of the non-ideality factor in current-voltage characteristics is also equal to 2, like to the case of recombination inside the space charge region, due to the effect of an isotypical barrier at the rear surface.

An overview of the results of work on the development of physical and physico-technological basis for creation of highly efficient (efficiency up to 20%, AM1,5) multi-barrier SEPCs for space and terrestrial applications based on silicon multilayered structures with combined diffusion and induced barriers, SEPCs with rear barriers and contact metallization, concentrating SEPCs and installations on their basis, combined solar panels and wind turbine installation intended to power low-power equipment in extreme field conditions, performed at the V.Ye. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics, National Academy of Sciences of Ukraine.

Keywords: resources, solar energy, solar panels, photoconverter of solar energy, efficiency of the solar cell.

1. *World Energy Scenarios: Composing energy futures to 2050*. World Energy Council, 2013.
2. *Perspectives on the Grand Energy Transition/World Energy Council*. Issues Monitor, 2018.
3. World energy resources, URL: https://en.wikipedia.org/wiki/World_energy_resources (Last accessed: 28.11.2018).
4. *World Energy Resources*. World Energy Council, 2016.
5. *Snapshot of Global Photovoltaic Markets*. Report IEA PVPS T1-33, 2018.
6. Photovoltaics report. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems. Freiburg, 19 June 2018. URL: www.ise.fraunhofer.de (Last accessed: 28.11.2018).
7. Solar energy. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_energy (Last accessed: 28.11.2018).
8. Фотовольтаика. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/фотовольтаика> (дата звернення: 28.01.2018).
9. Chapin D.M., Fuller C.S., Pearson G.O. A new silicon *p-n* junction photocell for converting solar radiation into electrical power. *J. Appl. Phys.* 1954. **25**, N 5. P. 676-677.
10. Солнечные миллиарды. Когда Украина сможет стать энергонезависимой <http://project.liga.net/projects/energoeffectivnost/> (дата звернення: 28.01.2018).
11. Green M.A. Commercial progress and challenges for photovoltaics. *Nature Energy*. 2016. **1**. P. 1-4.
12. Green MA, Hishikawa Y, Dunlop ED, Levi DH, Hohl-Ebinger J, Ho-Baillie AWY. Solar cell efficiency tables (version 51). *Prog. Photovolt. Res. Appl.* 2018 **26**. P. 3–12. <https://doi.org/10.1002/pip.2978>
13. Swanson R.M. Point contact solar cells: Modelling and experiment. *Solar Cells*. 1986. **17**, N 1. P. 85-118.
14. Verlinden P.J., Swanson R.M., Crane R.A. High efficiency silicon point-contact solar cells for concentrator and high value one-sun applications. *Book of abstracts 12th European photovoltaic solar energy conference*. Amsterdam. 1994. P. O9.1.
15. A. Jano, S. Tohoda, K. Matsuyama, Y. Nakamura, T. Nishiwaki, K. Fujita, M. Taguchi, and E. Maruyama. 24.7 record efficiency hit solar cell on thin silicon wafer. *28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*. 30 September – 4 October, 2013, Paris, France. P. 1846-1848.
16. Yoshikawa K., Kawasaki H., Yoshida W. et al. Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contacts for a photoconversion efficiency over 26%. *Nat. Energy*. 2017. **2**, N 5. P. 17032.
17. Zhao J, Wang A, Green MA, Ferrazza F. Novel 19.8% efficient “honey-comb” textured multicrystalline and 24.4% monocrystalline silicon solar cells. *Appl. Phys. Lett.* 1998. **73**, N 14. P. 1991-1993.
18. Richter A., Benick J., Feldmann F., Fell A., Hermle M., Glunz S.W. *n*-type Si solar cells with passivating electron contact: identifying sources for efficiency limitations by wafer thickness and resistivity variation. *Sol. Energy Mater Sol Cells*. 2017. **173**. P. 96-105.
19. Zhao X., Li D., Zhang T., Conrad B. et al. Short circuit current and efficiency improvement of SiGe solar cell in a GaAsP-SiGe dual junction solar cell on a Si substrate. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 2017. **159**. P. 86–93.
20. Essig S., Allebé C., Remo T. et al. Raising the one-sun conversion efficiency of III–V/Si solar cells to 32.8% for two junctions and 35.9% for three junctions. *Nature Energy*. 2017. **2**, N 9. P. 17144.
21. Cariou R., Benick J., Beutel P., Razeq N., Flotgen Ch., Hermle M., Lackner D., Glunz S.W., Bett A.W., Wimplinger M., and Dimroth F. Monolithic two-terminal III–V/Si triple solar cells with 30.2% efficiency under 1-Sun AM1.5g. *IEEE J. Photovolt.* 2017. **7**, N 1. P. 367–373.
22. Werner J., Barraud L., Walter A. et al. Efficient near-infrared-transparent perovskite solar cells enabling direct comparison of 4-terminal and monolithic perovskite – silicon tandem cells. *ACS Energy Lett.* 2016. **1**, N 2. P. 474–480.
23. Bush K.A., Palmstrom A.F., Yu Z.J. et al. 23.6%-efficient monolithic perovskite/silicon tandem solar cells with improved stability. *Nat. Energy*. 2017. **2**. P. 17009.
24. Shockley W. and Queisser H.J. Detailed balance limit of efficiency of *p-n* junction solar cells. *J. Appl. Phys.* 1961. **32**. P. 510–519.
25. Green M.A. Limits on the open-circuit voltage and efficiency of silicon solar cells imposed by intrinsic Auger processes. *IEEE Trans. Electron Devices*. 1984. **ED-31**, N 5. P. 671–678.
26. Tiedje T., Yablonovitch E., Cody G.D., and Brooks B.G. Limiting efficiency of silicon solar cells. *IEEE Trans. Electron Devices*. 1984. **ED-31**, N 5. P. 711–716.
27. Kerr M.J., Cuevas A., and Campbell P. Limiting efficiency of crystalline silicon solar cells due to Coulomb-enhanced Auger recombination. *Prog. Photovolt.: Res. Appl.* 2003. **11**. P. 97–104.
28. Richter A., Hermle M., and Glunz S.W. Reassessment of the limiting efficiency for crystalline silicon solar cells. *IEEE J. Photovolt.* 2013. **3**, N 4. P. 1185-1191.
29. Саченко А.В., Шкретий А.И., Коркишко Р.М., Костылев В.П., Кулиш Н.Р., Соколовский И.О. Особенности фотопреобразования в высокоэффективных кремниевых солнечных элементах. *ФТП*. 2015. **49**, №2. С. 271–277.
30. Kerr M. J. and Cuevas A. General parameterization of Auger recombination in crystalline silicon. *J. Appl. Phys.* 2002. **91**. P. 2473.

31. Altermatt P.P., Geelhaar F., Trupke T., Dai X., Neisser A., and Daub E. Injection dependence of spontaneous radiative recombination in crystalline silicon: Experimental verification and theoretical analysis. *Appl. Phys. Lett.* 2006. **88**. P. 261901-1–261901-3.
32. Schenk A. Finite-temperature full random-phase approximation mode of band gap narrowing for silicon device simulation. *J. Appl. Phys.* 1998. **84**. P. 3684–3695.
33. Almansouri I., Ho-Baillie A., and Green M.A. Ultimate efficiency limit of single-junction perovskite and dual-junction perovskite / silicon two-terminal devices. *Jpn. J. Appl. Phys.* 2015. **54**. P 08KD04-1 - 08KD04-6.
34. Костильов В.П., Саченко А.В., Власюк В.М., Коркішко Р.М., Соколовський І.О., Черненко В.В. Особливості формування рекомбінаційного струму в області просторового заряду кремнієвих сонячних елементів. *Український фізичний журнал.* 2016. **61**, № 10. P. 923-928.
35. Shockley W. The Theory of *p-n* Junctions in Semiconductors and *p-n* Junction Transistors. *Bell System Techn. J.* 1949. **28**, no 3. P. 435-489.
36. Саченко А. В., Костылев В. П., Соколовский И. О. и др. Особенности токопрохождения в гетеропереходных солнечных элементах на основе α -Si: H/Si. *Письма в ЖТФ.* 2017. **43**. № 3. С. 29 - 38.
37. Саченко А. В., Горбань А.П., Костылев В. П. и др. Параметр излучательной рекомбинации и внутренний квантовый выход электролюминесценции в кремнии. *ФТП.* 2006. **40**, №8. С. 213.
38. Sachenko A.V., Kostylyov V.P., Vlasyuk V.M., Sokolovskyi I.O., and Evstigneev M. The influence of the exciton nonradiative recombination in silicon on the photoconversion efficiency. *Proc. 32 European Photovoltaic Solar Energy Conf. and Exhib.*, Germany, Munich, June 20-24, 2016. P. 141-147.
39. Richter A., Glunz S., Werner F. et. al. Improved quantitative description of Auger recombination in crystalline silicon. *Phys. Rev. B.* 2012. **86**. P. 165202.
40. Саченко А.В., Крюченко Ю.В., Костылев В.П. и др. Метод оптимизации параметров гетеропереходных фотоэлектрических преобразователей на основе кристаллического кремния. *ФТП.* 2016. **50**, № 2. С. 259.
41. Саченко А.В., Костылев В.П., Бобыль А.В., Власюк В.Н., Соколовский И.О., Коноплев Г.А., Теруков Е.И., Шварц М.З., Евстигнеев М.А. Влияние толщины базы на эффективность фотопреобразования текстурированных солнечных элементов на основе кремния. *Письма в ЖТФ.* 2018, **44**. вып. 19. С. 40-49.
42. Trupke T., Zhao J., Wang A., Corkish R., Green M.A. Very efficient light emission from bulk crystalline silicon. *Appl. Phys. Lett.* 1991. **82**, N 18. P. 2996-2998.
43. Green M.A. Ag requirements for silicon wafer-based solar cells. *Prog. Photovolt.: Res. Appl.* 2009. **17**, N 3. P. 183-189.
44. Masuko K., Shigematsu M., Hashiguchi T. et al. Achievement of more than 25% conversion efficiency with crystalline silicon heterojunction solar cell. *IEEE J. Photovolt.* 2014. **4**, N 6. P. 1433-1435.
45. *Centre of Excellence for Advanced Silicon Photovoltaics and Photonics.* Annual Report, The Australian Research Council, Sidney. 2005.
46. Gogolin S., Ferre R. Turcu M., Harder N.-P. Silicon heterojunction solar cells: Influence of H₂-dilution on cell performance. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 2012. **106**. P. 47-50.
47. Mäckel H., Varner K. On the determination of the emitter saturation current density from lifetime measurements of silicon devices. *Prog. Photovolt.: Res. Appl.* 2013. **21**. P. 850–866.
48. Fell A. A free and fast three-dimensional/two-dimensional solar cell simulator featuring conductive boundary and quasi-neutrality approximations. *IEEE Trans. Electron Devices.* 2013. **60**, N 2. P. 733–738.
49. Sachenko A.V., Kryuchenko Yu.V., Kostylyov V.P. et al. Temperature dependence of photoconversion efficiency in silicon heterojunction solar cells: Theory vs experiment. *J. Appl. Phys.* 2016. **119**. P. 22570213.
50. Саченко А.В., Костылев В.П., Бобыль А.В., Власюк В.М., Соколовский И.О., Теруков Е.И., Евстигнеев М.А. Особенности моделирования эффективности фотопреобразования солнечных элементов на основе перовскитов. *Письма в ЖТФ.* 2017. **43**, вып. 14. С. 47 -54.
51. Костильов В.П., Саченко А.В. Перовскітні структури та сонячні елементи на їх основі: особливості отримання, характеристики та фізичних механізмів. *VIII українська наукова конференція з фізики напівпровідників УНКФН-8.* 2–4 жовтня 2018 Ужгород, Україна. Видавництво ТОВ «Рік-У». т. 1. С. 17 -20.
52. Костильов В.П., Саченко А.В., Бобыль А.В., Власюк В.М., Соколовський І.О., Теруков Є.І., Євстигнєєв М.О. Досяжна ефективність фотоперетворення в тандемних сонячних елементах на основі перовскітної *p-i-n* структури та НІТ елемента. *Сб. научных трудов IX Международной научной конференции “Функциональная база нанoeлектроники” (ФБН-2017),* 18–23 сентября 2017, Одесса, Украина. С. 169-173.
53. Саченко А.В., Крюченко Ю.В., Бобыль А.В. и др. Анализ возможностей реализации высоких значений эффективности фотопреобразования в тандемных гетеропереходных тонкопленочных солнечных элементах. *Письма в ПЖТФ.* 2015. **41**, вып. 10. С. 42-50.

54. You J., Hong Z., Yang M. et al. Low-temperature solution-processed perovskite solar cells with high efficiency and flexibility. *ASC Nano*. 2014. **8**, N 2. P. 1674; Chen Q., Zhou H., Hong Z. et al. J. Planar heterojunction perovskite solar cells via vapor-assisted solution process. *Am. Chem. Soc.* 2014. **136**. P. 622-625.
55. Саченко А.В., Крюченко Ю.В., Костылев В.П. и др. Метод оптимизации параметров гетеропереходных фотоэлектрических преобразователей на основе кристаллического кремния. *ФТП*. 2016. **50**, вып. 2. С. 259-263.
56. Горбань А.П., Костылёв В.П., Саченко А.В., Серба А.А., Черненко В.В. Разработка физико-технических основ создания высокоэффективных кремниевых фотопреобразователей и солнечных батарей космического и наземного применения. *Авиационно-космическая техника и технология*. 1999. Вып 8. С. 83-87.
57. Gorban' A.P., Kostylev V.P., Borschev V.N., Listratenko A.M. State and prospects of a development of silicon photoconverters and batteries for the space use. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2001. **55**, N 9. P. 94-100.
58. Оксанич А.П., Тербан В.А., Волохов С.О., Ключ М.І., Скришевський В.А., Костильов В.П., Макаров А.В. *Сучасні технології виробництва кремнію та кремнієвих фотоелектричних перетворювачів сонячної енергії*. Кривий Ріг: Мінерал, 2010.
59. Костильов В.П. *Процеси фотоелектричного перетворення енергії в кремнієвих багаточастотних структурах з дифузійно-польовими бар'єрами*: Дис. ... докт. фіз.-мат. наук: 01.04.01. Київ, 2009.
60. Литовченко В.Г., Мельник В.П., Романюк Б.М. та ін. Мобільні сонячні електростанції для використання в польових умовах]. *Вісник НАН України*. 2015. № 11. С. 59-66.
61. Коркішко Р.М., Мельник В.П., Романюк Б.М., Костильов В.П. Мобільний пристрій для живлення і зарядки малопотужної апаратури в польових умовах. *Патент на корисну модель 105847*, Україна, Н02J 7/35, Н01L 31/042. Заявник та власник патенту Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України. № U201508773 заявл. 10.09.2015, опубл. 11.04.2016. Бюл. № 7.
62. Горбань А.П., Костильов В.П., Саченко А.В., Серба О.А., Соколовський І.О., Черненко В.В. Вплив плаваючих *p-n* переходів на ефективність кремнієвих сонячних елементів з тильними контактами. *УФЖ*. 2010. **55**, № 7. С. 784-792.
63. Саченко А.В., Горбань А.П., Костильов В.П., Серба О.А., Соколовський І.О. Особливості фотоперетворення при концентрованому освітленні в кремнієвих сонячних елементах для стандартної і тильної геометрії розташування контактів. *УФЖ*. 2007. **52**, №7. С. 661-670.
64. *Аттестат акредитації Центра испытаний фотопреобразователей и батарей фотоэлектрических ИФН им. В.Е. Лашкарьова НАН Украины*, № ПТ-0327/03. Выданный 29 апреля 2003 года Украинским государственным научно-производственным центром стандартизации, метрологии и сертификации (УкрЦСМ).
65. Свідоцтво про атестацію Центру випробувань фотоперетворювачів та батарей фотоелектричних ІФН ім.В.Є. Лашкарьова НАН України, № ПТ-0359/06. Видане 30 жовтня 2006 року державним підприємством Всеукраїнський державний науково-виробничий центр стандартизації, метрології, сертифікації та захисту прав споживачів (Укрметрестандарт).

Інститут фізики напівпровідників
ім. В.Є. Лашкарьова НАН України
Центр випробувань фотоперетворювачів
та батарей фотоелектричних
41, проспект Науки, 03680 Київ, Україна
E-mail: vkost@isp.kiev.ua

Отримано 29.11.2018