

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОФІЗИКИ І РАДІАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Зайцев Роман Валентинович

УДК 621.472:629.78

**ЗАСТОСУВАННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ
ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ККД
КРИСТАЛІЧНИХ КРЕМНІЄВИХ
ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ**

01.04.07 – фізика твердого тіла

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2013

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному технічному університеті
«Харківський політехнічний інститут» МОН України, м. Харків.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
Копач Володимир Романович,
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» МОН України, м. Харків, доцент кафедри фізичного матеріалознавства для електроніки та геліоенергетики.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Чугай Олег Миколайович,
Національний аерокосмічний університету імені М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» МОН України, професор кафедри фізики

доктор технічних наук, доцент
Критська Тетяна Володимирівна,
Запорізька державна інженерна академія МОН України, професор кафедри електронних систем

Захист відбудеться «13» травня 2013 р. о 16⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.245.01 в Інституті електрофізики і радіаційних технологій НАН України за адресою: 61003, м. Харків, вул. Гамарника, 2, корпус У-3, НТУ «ХПІ», ауд. 204.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту електрофізики і радіаційних технологій НАН України за адресою: 61024, м. Харків, вул. Гуданова, 13.

Відгук на автореферат дисертації надсилати на адресу: 61002, м. Харків, вул. Чернишевська, 28, а/с 8812.

Автореферат розісланий 26 березня 2013 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 64.245.01



Пойда А.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Стрімкий розвиток екологічно чистих технологій енергозабезпечення та вражаючі практичні досягнення фотоенергетики викликали незворотне лавиноподібне зростання світового виробництва фотоелектричних перетворювачів (ФЕП) сонячної енергії. Останнім часом близько 90% обсягу світового виробництва ФЕП складає їх серійний випуск на основі кристалічного кремнію, з якого до 30% належить монокристалічним кремнієвим фотоелектричним перетворювачам (*Si*-ФЕП). Вказана тенденція матиме місце у найближчій і більш віддаленій перспективі. Це зумовлює актуальність досліджень, спрямованих на зниження вартості і підвищення ККД монокристалічних й полікристалічних *Si*-ФЕП та фотоенергетичних установок (ФЕУ) на їх основі.

Між тим, відомі на теперішній час напрямки оптимізації конструктивно-технологічного рішення (КТР) кристалічних *Si*-ФЕП і методи їх реалізації вже не дають змоги без значних витрат підвищувати ефективність роботи найдосконаліших з таких приладів, що спонукає до пошуку нових фізико-технічних й конструктивно-технологічних рішень, які були б більш прийнятними за критерієм «ціна-якість», де до другої складової належить ККД.

Наразі до таких досліджень відносяться комп'ютерне моделювання електронних процесів, котрі обумовлюють рівень ККД *Si*-ФЕП в залежності від особливостей їх КТР і діючих зовнішніх факторів, пошук нових зовнішніх факторів та пов'язаних з ними структурних й електронних процесів, котрі дозволяють додатково підвищувати ККД *Si*-ФЕП, і нарешті - створення на основі результатів зазначених досліджень високоефективних та економічних фотоелектричних сонячних батарей і ФЕУ. Серед сучасних інноваційних КТР перспективним уявляється новий напрямок низьковитратного підвищення ККД кристалічних *Si*-ФЕП шляхом дії на них стаціонарного магнітного поля (СМП), яке може викликати структурну перебудову початкового ансамблю точкових дефектів (ТД) і їх комплексів (КТД) у кремнієвих кристалах, а також призводити до реалізації у базових кристалах (*Si*-БК) фотоелектромагнітного (ФЕМ) ефекту Кікоїна-Носкова. Зазначене пов'язано з тим, що при належній вказаній перебудові дефектної структури кремнієвих кристалів зменшуватиметься концентрація рекомбінаційних центрів і підвищуватиметься час життя $\tau_{n,p}$ нерівноважних неосновних носіїв заряду (ННЗ), внаслідок чого зростатиме густина J_ϕ фотоструму *Si*-ФЕП. Щодо ФЕМ ефекту, то при оптимальній орієнтації СМП відносно *Si*-БК він також має забезпечувати позитивні доданки до J_ϕ за рахунок спрямованої у належних напрямках дії сили Лоренца на нерівноважні електрони й дірки.

При розробці нових фізико-технічних й конструктивно-технологічних рішень кристалічних *Si*-ФЕП і сонячних батарей з таких приладів суттєво удосконаленими мають бути методи їх атестації.

Таким чином, розробка нових фізико-технічних й конструктивно-технологічних рішень з низьковитратного підвищення ККД кристалічних *Si*-ФЕП і ФЕУ на їх основі шляхом дії на *Si*-ФЕП стаціонарного магнітного поля, а, також роботи з удосконалення методів атестації *Si*-ФЕП і з модернізації

необхідного для ефективної реалізації цих методів комплексу обладнання є вкрай актуальними.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалась на кафедрі фізичного матеріалознавства для електроніки та геліоенергетики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» у рамках держбюджетних тем № 0109U002224 (2009–2011 рр.) «Дослідження фізичних принципів оптимізації фотоелектричного перетворення в сонячних елементах з нанорозмірними сполученими шарами» і № 0112U000412 (2012–2014 рр.) «Розробка фізико-технічних основ інноваційних конструктивно-технологічних рішень перетворювачів сонячної енергії», у рамках міжнародного проекту Project STCU No. 4301 (2009–2011 рр.) «The development of laboratory technology for preparation the flexible solar cells on the CdTe base» та у рамках договору за держзамовленням Д-З-477-2011 «Розробка фотоенергетичної установки на основі багатоперехідних кремнієвих сонячних елементів з вертикальними діодними комірками» (2011-2012 рр.).

Мета і задачі дослідження. Мета дисертаційної роботи полягає у розробці фізико-технічних й конструктивно-технологічних основ нових економічних методів підвищення ККД кристалічних *Si*-ФЕП, заснованих на використанні стаціонарного магнітного поля та у якісному удосконаленні методів атестації *Si*-ФЕП і суттєвій модернізації комплексу обладнання, необхідного для ефективної реалізації цих методів.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі наукові та технічні **задачі**:

1. Розробити і виготовити світлодіодно-галогеновий освітлювач, здатний забезпечувати безперервне опромінювання досліджуваних об'єктів світлом потужністю $1 \div 4 \text{ кВт/м}^2$ з безперервним спектральним складом у діапазоні довжин хвиль $380 \leq \lambda \leq 1200 \text{ нм}$, що відповідає режимам АМ0 й АМ1,5, для реалізації методів експресного визначення фотоструму, вихідних та діодних параметрів *Si*-ФЕП з площею фотоприймальної поверхні до 25 см^2 .

2. Вдосконалити методики дослідження вихідних параметрів сучасних *Si*-ФЕП, площа фотоприймальної поверхні яких сягає 156 см^2 .

3. Експериментально з'ясувати можливості підвищення ККД кристалічних одноперехідних (ОП) *Si*-ФЕП з горизонтальною діодною структурою за рахунок їх попередньої обробки у стаціонарному магнітному полі різного походження і проаналізувати вплив такої обробки на час життя НЗ досліджуваних приладів.

4. Дослідити можливості підвищення ефективності роботи монокристалічних багатоперехідних (БП) *Si*-ФЕП з вертикальними діодними комірками (ВДК) і двосторонньою чутливістю за рахунок використання стаціонарного магнітного поля безпосередньо під час їх роботи для реалізації у цих приладах фотоелектромагнітного ефекту та провести аналіз залежності величин отриманих доданків до фотоструму і ККД та інших вихідних параметрів від умов роботи БП *Si*-ФЕП.

5. Розробити конструкцію і здійснити виготовлення лабораторного зразка ФЕУ з сонячною мінібатареею (СМБ) на основі БП Si -ФЕП у стаціонарному магнітному полі та з теплообмінником для її примусового охолодження при експлуатації в умовах висококонцентрованого сонячного опромінювання.

6. В лабораторних і натурних умовах дослідити вихідні параметри СМБ на основі БП Si -ФЕП, зокрема - при її експлуатації у складі виготовленого лабораторного зразка ФЕУ, і зробити обґрунтовані прогностичні оцінки щодо перспективи застосування стаціонарного магнітного поля для підвищення ККД значно більш потужних фотоенергетичних установок подібного типу.

Об'єкт дослідження. Фотоелектричні процеси у монокристалічних й полікристалічних одноперехідних Si -ФЕП з горизонтальною діодною структурою і у монокристалічних багатоперехідних Si -ФЕП з вертикальними діодними комірками й двосторонньою чутливістю до, після та при дії стаціонарного магнітного поля.

Предмет дослідження. Фотострум, діодні й вихідні параметри, час життя ННЗ монокристалічних і полікристалічних одноперехідних Si -ФЕП з горизонтальною діодною структурою і монокристалічних багатоперехідних Si -ФЕП з вертикальними діодними комірками та двосторонньою чутливістю до, після й при дії стаціонарного магнітного поля.

Методи дослідження. Скрайбування і розділення пластин монокристалічного кремнію на робочі фрагменти; хімічне травлення Si -БК у водних розчинах HF і $NaOH$; термічне окислення Si -БК на повітрі; вакуумна конденсація плівок Al на поверхні Si -БК; обробка Si -ФЕП у стаціонарному магнітному полі різного походження до їх опромінювання та при опромінюванні імітованим сонячним випромінюванням з різним рівнем концентрації; вимірювання та аналітичне опрацювання за допомогою відповідного програмного забезпечення світлових вольт-амперних характеристик (ВАХ) Si -ФЕП, епюр загасання фотопровідності та напруги холостого ходу U_{XX} після раптового припинення надходження світла до поверхні Si -БК та Si -ФЕП, відповідно.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше винайдено спосіб обробки ОП Si -ФЕП з горизонтальною діодною структурою у однорідному СМП, який підвищує їх ККД за рахунок збільшення густини струму короткого замикання, що зумовлено експериментально зафіксованим зростанням часу життя ННЗ у базових кристалах таких приладів.

2. Запропоновано новий фізичний механізм збільшення часу життя ННЗ у Si -ФЕП з горизонтальною діодною структурою, згідно з яким обробка таких приладів у СМП викликає перебудову початкової структури ТД та КТД у Si -БК з утворенням нового, метастабільного за станом, ансамблю ТД і КТД зі значно зниженою концентрацією рекомбінаційних центрів.

3. Вперше експериментально встановлено, що при орієнтації вектору магнітної індукції \vec{B} паралельно до опромінюваної поверхні БП Si -ФЕП та під кутом 90° до вектору густини фотоструму \vec{J}_ϕ при погляді з боку прямого надходження випромінювання (оптимальний напрямок \vec{B}) незалежно від величин B , коефіцієнту

концентрації сонячного випромінювання K_B і температури T відбувається максимальне підвищення ККД таких приладів зі зростанням B у порівнянні з випадком протилежного напрямку \vec{B} .

4. Вперше виявлений ефект підвищення ККД для БП Si -ФЕП у СМП з оптимальним напрямком \vec{B} і індукцією 0,2 Тл є найбільш вагомим при 24 ± 1 °С й $56 \leq K_B \leq 300$ в режимі прямого опромінювання їх фронтальної поверхні і одночасно дзеркального опромінювання їх тилової поверхні, завдяки якому під дією стаціонарного магнітного поля ККД, що за умов таких K_B і T має максимальне початкове значення на рівні 23-25 %, зростає на 1,1-2,2 % з середньою швидкістю до 7,4 %/Тл.

5. Встановлено, що особливості впливу модуля і орієнтації вектора \vec{B} на фотострум I_ϕ , струм короткого замикання $I_{КЗ}$ та ККД приладів типу БП Si -ФЕП, а також залежності $\tau_{n,p}$ від B пояснюються незалежним від напрямку \vec{B} підвищенням часу життя ННЗ зі зростанням B внаслідок ініціювання магнітним полем процесу розділення генерованих світлом електронно-діркових пар, а також внеском дії сили Лоренца у не дифузійну складову транспорту фотогенерованих носіїв заряду.

6. Розроблено інноваційну концепцію фотоенергетичного модуля нової генерації (ФМНГ) на основі примусово охолоджуваних БП Si -ФЕП, принципово відмінною особливістю якої є розташування виготовленої з БП Si -ФЕП сонячної мінібатареї в однорідному стаціонарному магнітному полі оптимального напрямку з індукцією $B > 0,1$ Тл, котре створюється постійними магнітами та дозволяє підвищити ККД СМБ не менше, ніж в 1,1 рази.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Створено комплект імітаторів сонячного випромінювання, до якого належать: універсальний світлодіодно-галогеновий освітлювач, здатний забезпечувати безперервне опромінювання досліджуваних об'єктів площею до 25 см^2 світлом потужністю $1 \leq P_B^* \leq 4 \text{ кВт/м}^2$ з безперервним спектральним складом у діапазоні довжин хвиль $380 \leq \lambda \leq 1200 \text{ нм}$, що відповідає режимам АМ1,5 та АМ0 при керованому варіюванні ступеня концентрації випромінювання $1 \leq K_B \leq 4$; галогеновий імітатор, який забезпечує однорідне опромінювання фотоприймальної поверхні (ФП) з $S \leq 200 \text{ см}^2$ стаціонарним випромінюванням у режимі, наближеному до АМ1,5, та при керованому варіюванні $0,4 \leq K_B \leq 2,0$; ксеноновий імпульсний імітатор заатмосферного сонячного випромінювання з пристроями типу вторинної концентруючої оптики до нього, що надає можливість підвищення керованого імпульсного значення K_B на ФП до $K_B = 1000$ при $S \leq 2 \text{ см}^2$ та до $K_B = 100$ при $S \leq 20 \text{ см}^2$ і відповідно імпульсних значень P_B^* на ФП - до $P_B^* = 1360 \text{ кВт/м}^2$ та до $P_B^* = 136 \text{ кВт/м}^2$.

2. Знайдено і реалізовано оптимальні схемо-технічні рішення вимірювальних кіл щодо розширення можливостей застосування компенсаційного методу вимірювання світлових ВАХ сучасних ОП Si -ФЕП з площею ФП до 200 см^2 та для усунення похибок вимірювання навантажувальних світлових ВАХ в умовах імпульсного опромінювання ОП Si -ФЕП й БП Si -ФЕП при їх ФП з $S < 10 \text{ см}^2$.

3. Розроблено методи і виготовлено відповідні пристрої, що завдяки використанню постійних магнітів (ПМ) й магнітного вінілу (МВ) забезпечують керовану за

тривалістю попередню обробку не опромінюваних базових кремнієвих кристалів, монокристалічних й полікристалічних ОП Si -ФЕП однорідним стаціонарним магнітним полем з індукцією $B \leq 0,2$ Тл, створюваним системою ПМ, і попередню обробку неоднорідним СМП з амплітудним значенням B від 0,1 Тл (створюваним МВ) до 2 Тл (створюваним системою ПМ).

4. Реалізований та запатентований в Україні економічно доцільний спосіб стабілізації підвищеного завдяки попередній обробці у однорідному СМП коефіцієнта корисної дії ОП Si -ФЕП, який реалізується шляхом спряження тильного електроду такого приладу з шаром магнітного вінілу, що створює у його базовому кремнієвому кристалі неоднорідне СМП з $\langle B \rangle \approx 0,05$ Тл.

5. Виготовлено лабораторні зразки ФМНГ та ФЕУ на його основі, результати лабораторної й натурної апробації яких довели здатність забезпечувати зростання фотоструму, а отже і ККД БП Si -ФЕП, збільшуючи ККД не менше, ніж у 1,1 рази при $B \geq 0,2$ Тл, а також доцільність послідовної комутації таких приладів у складі СМБ для оптимального вирішення задачі мінімізації втрат отримуваної від СМБ електричної енергії, що надходить до користувача. Розроблений лабораторний зразок ФЕУ став прототипом при створенні в НТУ «ХПІ» дослідного промислового зразка ФЕУ, який у відповідності до проведених розрахунків спроможний забезпечити перетворення річного прямого потоку сонячної енергії в умовах Криму (1350 кВт·год/м²) у 820 кВт·год електричної енергії та у 1611 кВт·год низькопотенційної теплової енергії.

Результати дисертації *впроваджено* у технологічний процес Публічним акціонерним товариством «Квазар» (ПАТ «Квазар», м. Київ). Це підтверджено Актом передачі та використання науково-технічних результатів дисертаційного дослідження.

Особистий внесок здобувача. Особисто автор дисертації:

- здійснював самостійний пошук та аналіз літературних джерел, що стосуються дисертаційного дослідження;
- брав участь у постановці мети і задачі дослідження, виборі експериментальних та теоретичних методик;
- обговорення отриманих результатів проводилося разом з науковим керівником;
- автор також особисто брав участь: у розробці та реалізації методів обробки Si -ФЕП в стаціонарному магнітному полі різного походження до їх опромінювання та при опромінюванні імітованим сонячним випромінюванням з різним рівнем концентрації, у патентуванні методу підвищення ККД монокристалічних Si -ФЕП за рахунок обробки в СМП магнітного вінілу; у розробці, модернізації й реалізації методів атестації Si -БК і кристалічних Si -ФЕП; вимірював світлові ВАХ досліджуваних Si -ФЕП, епюри спаду фотопровідності та напруги холостого ходу, а також здійснював аналітичне опрацювання отриманих результатів;
- дисертант провів оціночні розрахунки доданку за рахунок ФЕМ ефекту до току короткого замикання та напруги холостого ходу при відповідній орієнтації

БП Si-ФЕП відносно напрямків вектору магнітної індукції та світлового потоку, що надходить до фотоприймальної поверхні такого приладу;

– створення лабораторного зразка ФЕУ з використанням досліджених ефектів та його натурна апробація виконувалися за безпосередньою участю дисертанта;

– низка експериментів та інтерпретація їх результатів проведені в творчій співпраці з науковим керівником та співавторами відповідних публікацій;

– дисертант брав безпосередню участь у підготовці матеріалів за темою дисертації до публікацій.

Апробація результатів дисертації. Результати роботи доповідалися та обговорювалися на таких конференціях: Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (Харків, 2009 р., 2010 р., 2011 р., 2012 р.), IV Міжнародна науково-практична конференція «Матеріали електронної техніки та сучасні інформаційні технології» (Кременчук, 2010 р.), XVI Міжнародна науково-технічна конференція «Силова електроніка та енергоефективність» (Алушта, 2010 р.), I Міжнародна науково-практична конференція «Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка» (Кременчук, 2011 р.) і при роботі VIII Всеросійської наукової молодіжної школи з міжнародною участю «Возобновляемые источники энергии» (Москва, 2012 р.).

Публікації. Результати досліджень, викладених у дисертації, опубліковані у 27 наукових працях. Зокрема, у 9 наукових статтях у фахових журналах, які відповідають вимогам ВАК України, у 16 тезах доповідей на міжнародних і республіканських конференціях, а також у двох Патентах України на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, 5 розділів, висновків, 3 додатків, переліку використаних джерел зі 153 найменувань. Загальний обсяг дисертації складає 224 сторінки (з яких власне текстова складова міститься на 182 сторінках), у тому числі 88 рисунків та 27 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність вибраного напрямку досліджень, сформульовані мета і задачі роботи, обґрунтовано вибір об'єктів дослідження, наведені наукова новизна і практичне значення одержаних у дисертаційній роботі результатів. Викладено відомості про апробацію результатів і публікації, відображено зв'язок тематики дисертаційної роботи з науковими програмами кафедри фізичного матеріалознавства для електроніки та геліоенергетики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» МОмолодьспорту України, м. Харків.

У першому розділі «Фізичні передумови підвищення ККД кристалічних кремнієвих фотоелектричних перетворювачів при дії на них стаціонарного магнітного поля та стан і метрологічне забезпечення розробки цих приладів» висвітлено сучасні досягнення з оптимізації конструктивно-технологічних рішень

Si-ФЕП, а також проведено аналітичний пошук нових низьковитратних ефектів, здатних підвищити їх ККД. Визначено, що доцільним для практичного використання є залучення ефекту перебудови структури ансамблю точкових дефектів і їх комплексів усередині кремнієвих кристалів під час тривалої витримки ОП *Si*-ФЕП у стаціонарному магнітному полі, з яким може бути пов'язане зростання часу життя ННЗ, та ефекту зростання фотоструму приладу під дією стаціонарного магнітного поля безпосередньо при опроміненні БП *Si*-ФЕП з ВДК. Показано, що для отримання надійних і достовірних результатів при дослідженні акцентованих вище ефектів необхідно вдосконалити існуючі експериментальні методики дослідження фотоелектричних властивостей як окремих кремнієвих кристалів, так і відповідних приладів на їх основі.

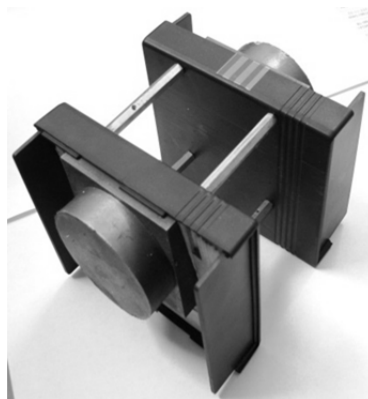
У другому розділі «Нові та вдосконалені засоби і методи атестації кремнієвих фотоелектричних перетворювачів» описані експериментальні установки і методики, що дали можливість виконати комплекс експериментальних досліджень обраних об'єктів. Знайдено і реалізовано оптимальні схемо-технічні рішення подільника напруги потужністю 100 Вт з вихідним опором 0,1 Ом та струмового резистора потужністю 50 Вт з опором 0,011 Ом для розширення можливостей застосовуваного компенсаційного методу вимірювання світлових ВАХ сучасних *Si*-ФЕП з площею фотоприймальної поверхні до 200 см². Для усунення похибок вимірювання навантажувальних світлових ВАХ в умовах імпульсного опромінювання *Si*-ФЕП, пов'язаних з впливом реактивної компоненти дрових опорів навантаження, а також з урахуванням специфіки вказаних ВАХ для багатоперехідних *Si*-ФЕП, створено багатodeкадні магазини лише активних опорів навантаження, які дозволяють змінювати величину останніх від 1 Ом до 10⁶ Ом з керованим кроком від 1 Ом. Особливу увагу приділено питанням, пов'язаним з розробкою і виготовленням універсального світлодіодного галогенового освітлювача (рис. 1), можливості якого згідно з результатами здійсненого калібрування дозволяють проводити достовірні експресні дослідження фотоструму, діодних і вихідних параметрів *Si*-ФЕП різної конструкції й різного призначення з площею фотоприймальної поверхні до 25 см² за рахунок належного імітування стандартних наземних та заатмосферного сонячних спектрів при керованому варіюванні ступню концентрації стаціонарного випромінювання в діапазоні $1 \leq K_B \leq 4$, що відповідає діапазону питомих потужностей P_B^* стаціонарного випромінювання від 1000 Вт/м² до 4000 Вт/м².

Йдеться також про розроблені методи і виготовлені пристрої, що завдяки використанню постійних магнітів (ПМ) й магнітного вінілу (МВ) забезпечують керовану за тривалістю обробку не опромінюваних базових кремнієвих кристалів, монокристалічних й полікристалічних ОП *Si*-ФЕП однорідним стаціонарним магнітним полем з індукцією $B \leq 0,2$ Тл (створюваним системою ПМ) і неоднорідним СМП з амплітудним значенням B від 0,1 Тл (створюваним МВ) до 2 Тл (створюваним системою ПМ). Винайдено спосіб реалізації неоднорідного СМП магнітного вінілу усередині ОП *Si*-ФЕП не тільки до їх опромінювання, але й при роботі цих приладів в умовах опромінювання з $0,4 \leq K_B \leq 2,0$. Створено методику і виготовлено відповідний до неї рухомий магнітний блок з чотир-

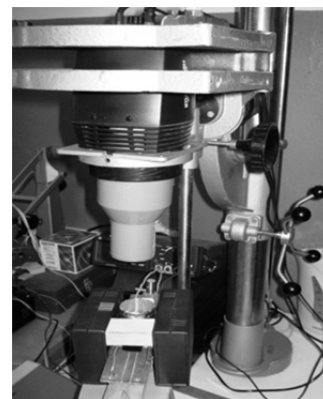
ма ПМ у його складі, що надають можливість експериментально досліджувати вплив однорідного СМП на фотострум, вихідні параметри й ККД багатоперехідних Si -ФЕП в умовах реалізації фотоелектромагнітного ефекту Кікоїна-Носкова при концентраціях імітованого сонячного випромінювання $1 \leq K_B \leq 1000$, протилежних напрямках вектора магнітної індукції \vec{B} та $|\vec{B}| \leq 0,2$ Тл (рис. 2).



Рис. 1. Вигляд випромінювача універсального світлодіодно-галогенового освітлювача з боку джерел випромінювання (темні ділянки відповідають позиціям інфрачервоних світлодіодів з лінзами)



а



б

Рис. 2. Устрій магнітного блоку (а) та спосіб його застосування при вимірюванні навантажувальних світловий ВАХ досліджуваних БП Si -ФЕП під імпульсним імітатором (б) у зазорі між постійними магнітами, що знаходяться усередині двох боксів магнітного блоку

Для визначення характеру впливу дефектності базових шарів фотоелектричних перетворювачів на їх параметри створено методику моделювання залежності часу життя ННЗ від асортименту та концентрації точкових дефектів і їх комплексів у кристалах кремнію з використанням електронної моделі Si -ФЕП.

У третьому розділі «Вплив попередньої обробки у стаціонарному магнітному полі на час життя неосновних носіїв заряду в базових кремнієвих кристалах та на фотострум, діодні й вихідні параметри фотоелектричних перетворювачів» викладено результати кількісного математичного моделювання залежності та діаграм часу життя $\tau_{n,p}$ нерівноважних неосновних носіїв заряду від концентрації найбільш характерних для приладів досліджуваного типу точкових дефектів та їх комплексів (рис. 3). Встановлено, наприклад, що при фіксованій концентрації домішок усередині базових кристалічних шарів кремнію найбільший вплив на зростання $\tau_{n,p}$ має перебудова точкових дефектів Ti_i і Zn_i у їх комплекси Ti_i-Ti_i й Zn_i-Zn_i , а також КТД з бівакансіями та тривакансіями кремнію (V_2 , V_2-O_i , V_3) у КТД з його моновакансіями ($V-P$ і $V-2As$) (рис. 3, а).

Експериментально визначено, що обробка монокристалів кремнію марки КДБ-7,5 в однорідному СМП з індукцією $B = 0,2$ Тл протягом 7 діб при температурі $T = 20 \pm 5$ °С призводить до підвищення $\tau_{n,p}$ на 9-45 %. Запропоновано ме-

ханізм зазначеного ефекту, згідно з яким обробка монокристалічного кремнію в СМП викликає перебудову початкової структури ТД та КТД у кристалі з утворенням нового, метастабільного за станом, ансамблю ТД та КТД зі значно зниженою концентрацією рекомбінаційних центрів, що і є чинником підвищення часу життя ННЗ.

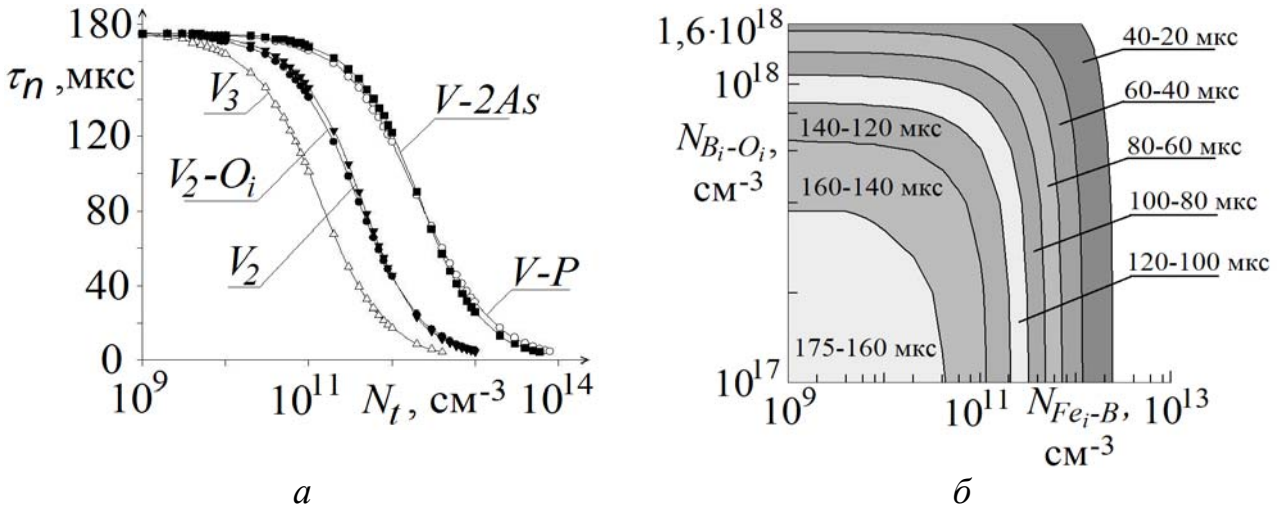


Рис. 3. Залежність часу життя ННЗ від концентрації комплексів точкових дефектів з вакансіями (а) та діаграма залежності часу життя ННЗ при одночасному домінуючому впливі комплексів B_i-O_i і Fe_i-B від їх концентрації (б)

Виявлено, що попередня обробка монокристалічних ОП Si-ФЕП з горизонтальною діодною структурою у однорідному СМП підвищує їх ККД переважно за рахунок збільшення густини струму короткого замикання, яке зумовлено експериментально зафіксованим зростанням часу життя ННЗ. Безпосередньо після попередньої обробки таких ОП Si-ФЕП у однорідному СМП протягом 7 діб при $B = 0,2$ Тл і $T = 20 \pm 5$ °С спостерігається підвищення їх ККД приблизно у 1,1-1,4 рази (рис. 4).

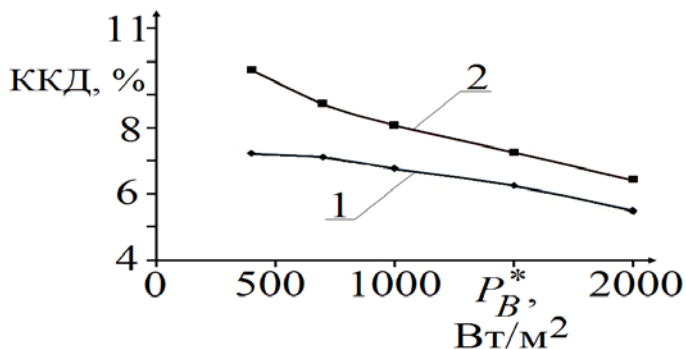


Рис. 4. Залежності ККД монокристалічних ОП Si-ФЕП від питомої потужності опромінювання у початковому стані (1) та після обробки у СМП з $B = 0,2$ Тл протягом 7 діб (2)

Експериментально встановлено, що безпосередньо після попередньої обробки полікристалічних ОП Si-ФЕП у однорідному СМП протягом 7 діб при

Грунтовно досліджено і запатентовано в Україні економічно доцільний спосіб стабілізації позитивного і практично важливого результату вказаної вище попередньої дії однорідного СМП на ОП Si-ФЕП, який реалізується шляхом спряження тильного електроду відповідного приладу з шаром магнітного вінілу завтовшки близько 1,5 мм, що створює у її базовому кремнієвому кристалі неоднорідне СМП з $\langle B \rangle \approx 0,05$ Тл.

$B = 0,2$ Тл і $T = 20 \pm 5$ °С спостерігається підвищення їх ККД приблизно на 6-7 відн. %, яке є нижчим в 1,04-1,20 рази за якісно аналогічний ефект для монокристалічних ОП Si-ФЕП, котрий має місце при тотожних умовах дії на них однорідного СМП.

Виявлено, що попередня обробка монокристалічних ОП Si-ФЕП при $T = 20 \pm 5$ °С шляхом їх лінійного сканування вздовж тилової поверхні з середньою швидкістю близько 200 мкм/хв. у сильно неоднорідному СМП зі зміною індукції магнітного поля за товщиною базового кристалу від 1,5 Тл з боку фотоприймальної поверхні до 2,0 Тл з боку тильної поверхні, створеному спеціальним магнітним блоком типу магнітної головки, надає можливість підвищувати ККД таких приладів приблизно у 1,1 рази лише за 200 хвилин. Запропоновано механізм суттєвого скорочення тривалості такого типу попередньої обробки монокристалічних ОП Si-ФЕП у порівнянні з її тривалістю при використанні однорідного СМП з $B = 0,2$ Тл, який враховує додатковий силовий вплив градієнтного магнітного поля у протилежних напрямках на парамагнітні та діамагнітні точкові дефекти в базових кремнієвих кристалах.

У четвертому розділі «Ефективність роботи багатоперехідних фотоелектричних перетворювачів з вертикальними діодними комітками при безпосередній дії на них однорідного стаціонарного магнітного поля» викладено результати дослідження впливу орієнтації і модуля вектора \vec{B} індукції однорідного СМП на фотострум I_ϕ й вихідні параметри БП Si-ФЕП з ВДК при температурах $T = 24 \pm 1$ °С і $T = 31 \pm 1$ °С, прямому опромінюванні їх фронтальної поверхні або при прямому опромінюванні їх фронтальної поверхні і одночасно дзеркальному опромінюванні їх тилової поверхні імітованим сонячним випромінюванням зі спектральним складом, що відповідав режиму АМ0 зі ступенями концентрації $1 \leq K_B \leq 1000$ на фронтальній поверхні цих приладів. Експериментально встановлено, що при орієнтації \vec{B} паралельно до опромінюваної поверхні БП Si-ФЕП з ВДК та під кутом 90° до вектору густини фотоструму \vec{J}_ϕ при погляді з боку прямого надходження випромінювання (оптимальний напрямок \vec{B}) незалежно від величин B , T і K_B відбувається максимальне підвищення ККД таких приладів зі зростанням B у порівнянні з випадком протилежного напрямку \vec{B} .

Ефект підвищення ККД для БП Si-ФЕП з ВДК у СМП з оптимальним напрямком \vec{B} і $B = 0,2$ Тл є найбільш вагомим при 24 ± 1 °С й $56 \leq K_B \leq 300$ в режимі прямого опромінювання їх фронтальної поверхні і одночасно дзеркального опромінювання їх тилової поверхні, завдяки якому під дією стаціонарного магнітного поля ККД, що за умов таких T і K_B має максимальне початкове значення на рівні 23-25 %, зростає на 1,1-2,2 %. Рівень освітленості приладів типу БП Si-ФЕП з ВДК помітно впливає на середню швидкість $\nu_{ККД}$ зростання їх ККД зі збільшенням $|\vec{B}|$. При $K_B = 100$ максимальне значення $\nu_{ККД}$ зростає приблизно до 7,4 %/Тл. З підвищенням T до 31 ± 1 °С ККД приладів типу БП Si-ФЕП декілька зменшується, що для Si-ФЕП різних типів є якісно відомим ефектом, обумовленим переважно зменшенням їх напруги холостого ходу. Рисунок 5 ілюструє типову залежність ККД від $|\vec{B}|$ для БП Si-ФЕП з ВДК при $K_B = 100$,

$T = 31 \pm 1$ °C і опромінюванні приладу з боку тільки однієї фотоприймальної поверхні.

Експериментально встановлено, що підвищення ККД приладів БП Si-ФЕП з ВДК під впливом на них СМП неодмінно супроводжується помітним збільшенням часу життя ННЗ у базових кристалах їх ВДК, котре для таких приладів з ВДК, наприклад, $p^+ - n - n^+$ типу зростає від $251 \leq \tau_p \leq 258$ мкс при $B = 0$ до $264 \leq \tau_p \leq 272$ мкс при $B = 0,2$ Тл незалежно від напрямку \vec{B} (рис. 6).

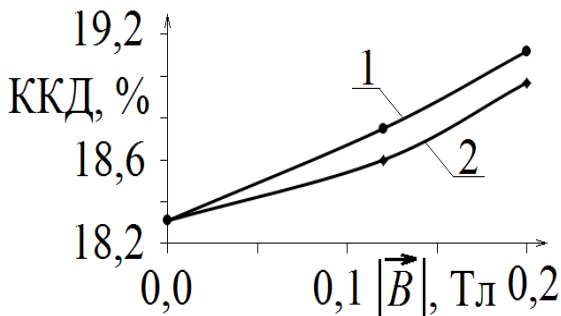


Рис. 5. Графіки залежностей ККД БП Si-ФЕП від величини B при $K_B = 100$: 1 - $0 \leq B \leq + 0,20$ Тл; 2 - $0,20 \leq B \leq 0$ Тл

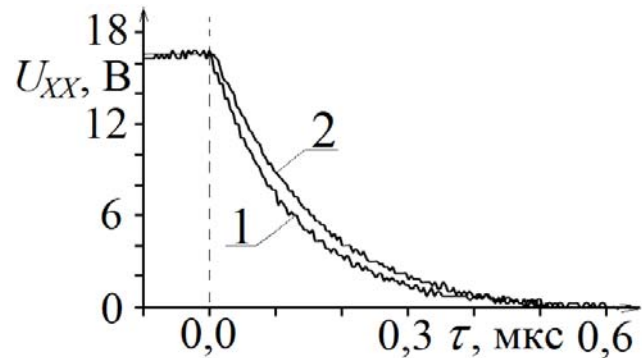


Рис. 6. Типові залежності U_{XX} від τ при: 1 - $B = 0$ і 2 - $B = 0,2$ Тл (за якими визначались величини τ_p)

Встановлені особливості впливу орієнтації і модуля вектора \vec{B} на I_ϕ , струм короткого замикання I_{K3} та ККД приладів типу БП Si-ФЕП з ВДК обумовлені ініціюванням магнітним полем процесу розділення генерованих світлом електронно-діркових пар, а також внеском дії сили Лоренца у не дифузійну складову транспорту фотогенерованих носіїв заряду при їх прямуванні до сильно легованих шарів ВДК, яка при оптимальному напрямку \vec{B} обумовлює позитивні доданки до I_ϕ та I_{K3} і тому – до ККД, а при протилежному напрямку \vec{B} - негативні доданки до величин цих параметрів.

У п'ятому розділі «Лабораторний зразок фотоенергетичної установки концентратора типу з сонячною мінібатареєю на основі багатоперехідних кремнієвих фотоелектричних перетворювачів в однорідному стаціонарному магнітному полі» викладено результати розробки концепції фотоенергетичного модуля нової генерації на основі примусово охолоджуваних БП Si-ФЕП, принципово відмітною особливістю якої є розташування виготовленої з БП Si-ФЕП сонячної мінібатареї в однорідному стаціонарному магнітному полі оптимального напрямку з індукцією $B > 0,1$ Тл, котре створюється постійними магнітами (рис. 7, а).

Відповідно до цієї концепції виготовлено лабораторні зразки (ЛЗ) ФМНГ (рис. 7, б) з СМБ (що має площу фотоприймальної поверхні $S = 5,76$ см², спряжена термопастою з тепловим колектором і розташована у СМП оптимального напрямку з $B = 0,2$ Тл, яке підвищує ККД СМБ не менше, ніж в 1,1 рази) та ФЕУ, головними складовими якої є: такий ЛЗ ФМНГ, фацетний дзеркальний концентратор, що забезпечує на фотоприймальній поверхні СМБ висококонце-

нтроване сонячне випромінювання (ВКСВ) зі ступенем концентрації $K_B = 120$, й система примусового водоохолодження, яка дозволяє підтримувати робочу температуру СМБ на рівні 43-45 °С та поряд з електричною енергією додатково отримувати низькопотенційну теплову енергію.

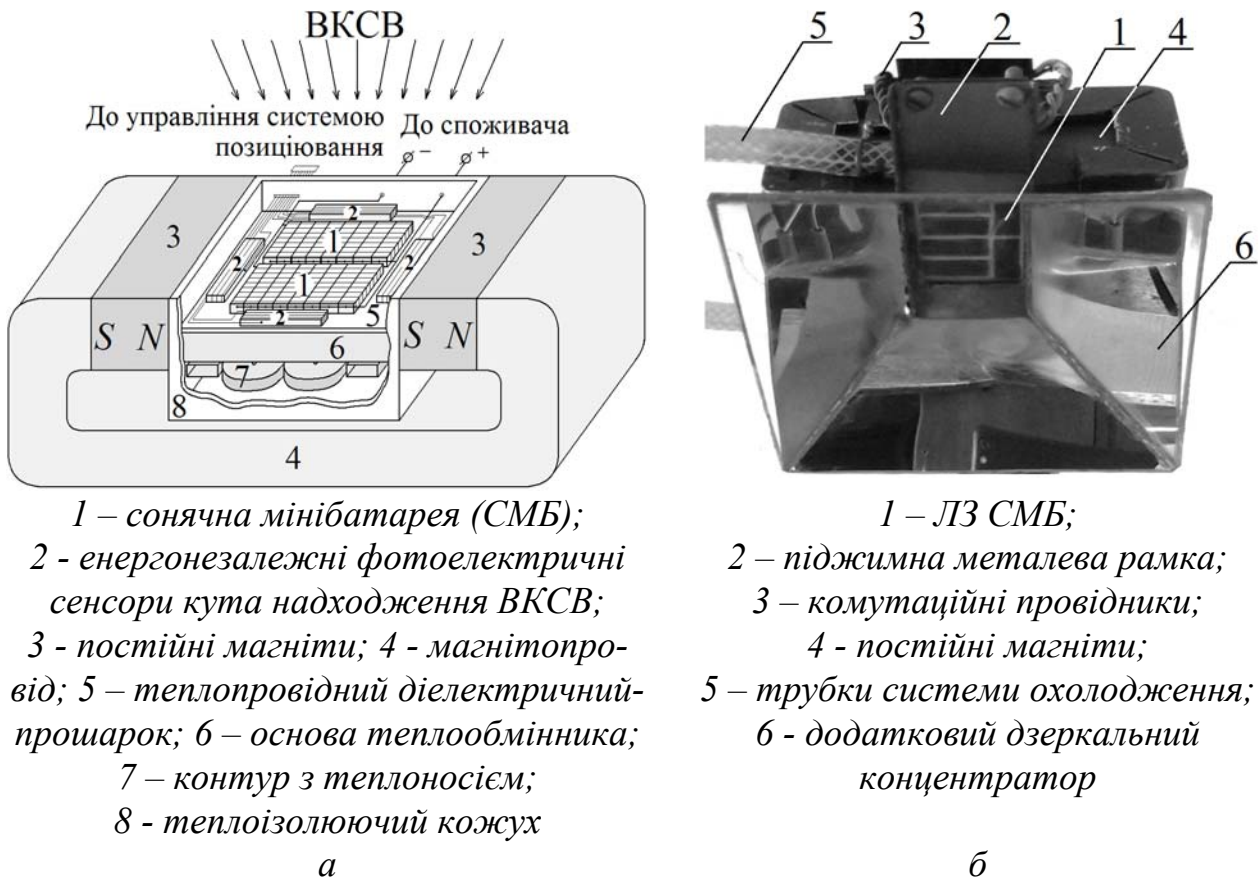


Рис. 7. Схематичне зображення (а) запропонованої концепції ФМНГ та зовнішній вигляд (б) створеного ЛЗ ФМНГ

Експериментально показано, що наведені вище інноваційні фізико-технічні рішення лабораторного зразка ФЕУ дозволяють в натурних умовах м. Харкова впродовж вересня при послідовній комутації БП Si-ФЕП у складі СМБ отримувати середнє значення його ККД за електричною та тепловою енергією разом на рівні до 38 %. Використання у складі такого ЛЗ ФЕУ найбільш ефективних БП Si-ФЕП з ККД в СМБ до 26 % дозволить згідно з виконаними оцінювальними розрахунками збільшити його ККД за електричною та тепловою енергією разом до 53 %.

Розроблений ЛЗ ФЕУ став прототипом при створенні в НТУ «ХПІ» дослідного промислового зразка ФЕУ, який у відповідності до проведених розрахунків спроможний забезпечити перетворення річного прямого потоку сонячної енергії в умовах Криму (1350 кВт·год/м²) у 820 кВт·год електричної енергії і у 1611 кВт·год низькопотенційної теплової енергії при площі апертури дзеркального фасетного концентратора 2,75 м² й $K_B = 500$ на фотоприймальній поверхні

СМБ з $S = 55 \text{ см}^2$, що при ККД останньої до 26 % обумовлює її максимальну корисну потужність до $P_{СМБ} = 500 \text{ Вт}$.

За вказаними вище параметрами СМБ граничне відношення $P_{СМБ}$ до її маси сягає 40 кВт/кг, а питома потужність СМБ наближується до 90 кВт/м². При цьому витрата монокристалічного кремнію на один ФМНГ з такою СМБ приблизно в 100 разів менша, ніж для вітчизняних серійних кремнієвих сонячних модулів аналогічної потужності, що є надійною передумовою для суттєвого зниження вартості електричної енергії, отримуваної за допомогою ФМНГ на основі СМБ відповідної конструкції, розташованої у СМП з $B \geq 0,2 \text{ Тл}$.

У додатку А наведено акт передачі та використання науково-технічних результатів дисертаційного дослідження щодо впровадження у ПАТ «Квазар» (м. Київ) методів підвищення ККД у 1,1 рази для ОП Si-ФЕП за рахунок їх попередньої обробки у однорідному СМП і наступного розміщення у СМП магнітного вінілу та для БП Si-ФЕП за рахунок реалізації фотоелектромагнітного ефекту під час їх роботи у однорідному СМП з оптимальним напрямком орієнтації вектору індукції СМП відносно опромінюваних приладів.

У додатку Б наведено вихідні і діодні параметри та час життя ННЗ досліджуваної групи зразків виробництва ПАТ «Квазар».

У додатку В наведено вихідні параметри досліджуваної групи зразків БП Si-ФЕП у різних режимах опромінювання в залежності від напрямку та величини індукції СМП.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У результаті проведених дисертантом досліджень комплексно вирішено важливу науково-практичну задачу фізики твердого тіла - розроблено фізико-технічні й технологічні основи нових способів підвищення ККД кристалічних Si-ФЕП, котрі засновано на використанні стаціонарного магнітного поля, та якісно удосконалено методи атестації Si-ФЕП і суттєво модернізовано комплект обладнання, необхідного для ефективної реалізації цих методів.

Основні результати роботи можна сформулювати у вигляді таких висновків:

1. Для достовірного визначення фотоструму, діодних й вихідних параметрів досліджуваних кристалічних одноперехідних кремнієвих фотоелектричних перетворювачів (ОП Si-ФЕП) з горизонтальною діодною структурою площею $1 \leq S \leq 156 \text{ см}^2$ і багатоперехідних (БП) Si-ФЕП висококонцентраторного типу з вертикальними діодними комітками (ВДК) й двосторонньою чутливістю створено комплект імітаторів сонячного випромінювання, до якого належать: розроблений і виготовлений універсальний світлодіодно-галогеновий освітлювач, здатний забезпечувати безперервне опромінювання досліджуваних об'єктів площею до 25 см^2 світлом потужністю $1 \leq P_B^* \leq 4 \text{ кВт/м}^2$ з безперервним спектральним складом у діапазоні довжин хвиль $380 \leq \lambda \leq 1200 \text{ нм}$, що відповідає режимам АМ1,5 та АМ0 при керованому варіюванні ступеня концентрації випромінювання $1 \leq K_B \leq 4$; виготовлений галогеновий імітатор, який забезпечує однорідне опромінювання фотоприймальної поверхні (ФП) з $S \leq 200 \text{ см}^2$ стаціонарним випромінюванням у режимі, на-

ближеному до АМ1,5, та при керованому варіюванні $0,4 \leq K_B \leq 2,0$; суттєво удосконалений ксеноновий імпульсний імітатор заатмосферного сонячного випромінювання з розробленими і виготовленими пристроями типу вторинної концентруючої оптики до нього, що надає можливість підвищення керованого імпульсного значення K_B на ФП до $K_B = 1000$ при $S \leq 2 \text{ см}^2$ та до $K_B = 100$ при $S \leq 20 \text{ см}^2$ і відповідно імпульсних значень P_B^* на ФП - до $P_B^* = 1360 \text{ кВт/м}^2$ та до $P_B^* = 136 \text{ кВт/м}^2$.

2. Розроблено методи і виготовлено відповідні пристрої, що завдяки використанню постійних магнітів (ПМ) й магнітного вінілу (МВ) забезпечують керовану за тривалістю попередню обробку (ПО) не опромінюваних базових кремнієвих кристалів, монокристалічних й полікристалічних ОП Si-ФЕП однорідним стаціонарним магнітним полем (СМП) з індукцією $B \leq 0,2 \text{ Тл}$, створюваним системою ПМ, і ПО неоднорідним СМП з амплітудним значенням B від $0,1 \text{ Тл}$ (створюваним МВ) до 2 Тл (створюваним системою ПМ).

3. Виявлено, що попередня обробка кристалічних ОП Si-ФЕП з горизонтальною діодною структурою у однорідному СМП підвищує їх ККД переважно за рахунок збільшення густини струму короткого замикання, котре зумовлено експериментально зафіксованим зростанням часу життя $\tau_{n,p}$ неосновних носіїв заряду (ННЗ). Безпосередньо після ПО таких ОП Si-ФЕП у однорідному СМП протягом 7 діб при $B = 0,2 \text{ Тл}$ і $T = 20 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ спостерігається підвищення їх ККД приблизно у 1,1-1,4 рази. Запропоновано механізм зазначеного ефекту, згідно з яким обробка кристалічного кремнію в СМП викликає перебудову початкової структури точкових дефектів (ТД) та їх комплексів (КТД) у кристалічному шарі з утворенням нового, метастабільного за станом, ансамблю ТД та КТД зі значно зниженою концентрацією рекомбінаційних центрів, що і є чинником підвищення часу життя ННЗ. Розроблено та запатентовано спосіб стабілізації попередньої дії однорідного СМП на ОП Si-ФЕП, який реалізується шляхом спряження тильного електроду відповідного приладу з шаром магнітного вінілу, що створює у його базовому кремнієвому кристалі неоднорідне СМП з $\langle B \rangle \approx 0,05 \text{ Тл}$.

4. Досліджено вплив орієнтації і модуля вектора \vec{B} індукції СМП на фотострум й вихідні параметри БП Si-ФЕП. Експериментально встановлено, що при орієнтації \vec{B} паралельно до опромінюваної поверхні БП Si-ФЕП та під кутом 90° до вектору густини фотоструму \vec{J}_ϕ при погляді з боку прямого надходження випромінювання (оптимальний напрямок \vec{B}) незалежно від величин B , K_B і температури T відбувається максимальне підвищення ККД таких приладів зі зростанням B у порівнянні з випадком протилежного напрямку \vec{B} .

5. Ефект підвищення ККД для БП Si-ФЕП у СМП з оптимальним напрямком \vec{B} і індукцією $0,2 \text{ Тл}$ є найбільш вагомим при $24 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ й $56 \leq K_B \leq 300$ в режимі прямого опромінювання їх фронтальної поверхні і одночасно дзеркального опромінювання їх тилової поверхні, завдяки якому під дією стаціонарного магнітного поля ККД, що за умов таких K_B і T має максимальне початкове значення на рівні 23-25 %, зростає на 1,1-2,2 % з середньою швидкістю $\nu_{\text{ККД}}$ до 7,4 %/Тл. Зміна напрямку \vec{B} з оптимального на протилежний негативно впливає на ККД БП Si-ФЕП

під дією на них СМП, що має прояв у зменшенні середньої швидкості $v_{\text{ККД}}$, максимальне значення якої для БП Si-ФЕП у випадку протилежного напрямку \vec{B} складає близько 2,2 %/Тл. При цьому відповідні зміни величин фотоструму I_{ϕ} і струму короткого замикання $I_{\text{КЗ}}$ є головним чинником експериментально встановленої залежності ККД від \vec{B} . Експериментально встановлено, що підвищення ККД приладів типу БП Si-ФЕП з ВДК під впливом на них СМП неодмінно супроводжується помітним збільшенням часу життя ННЗ у базових кристалах їх ВДК, котрий, наприклад, для таких приладів з ВДК $p^+ - n - n^+$ типу зростає від 251-258 мкс при $B = 0$ до 264-272 мкс при $B = 0,2$ Тл незалежно від напрямку \vec{B} .

6. Встановлені особливості залежності $\tau_{n,p}$ від B й впливу орієнтації і модуля вектора \vec{B} на I_{ϕ} , $I_{\text{КЗ}}$ та ККД приладів типу БП Si-ФЕП з ВДК пояснюються відповідно незалежним від напрямку \vec{B} підвищенням часу життя ННЗ зі зростанням $|\vec{B}|$ внаслідок ініціювання магнітним полем процесу розділення генерованих світлом електронно-діркових пар, а також внеском дії сили Лоренца у не дифузійну складову транспорту фотогенерованих носіїв заряду при їх прямуванні до сильно легованих шарів ВДК, яка при оптимальному напрямку \vec{B} обумовлює позитивні доданки до I_{ϕ} та $I_{\text{КЗ}}$ і тому – до ККД, а при протилежному напрямку \vec{B} - негативні доданки до величин цих параметрів.

7. Виготовлено лабораторні зразки (ЛЗ) фотоенергетичного модуля нової генерації (ФМНГ) з сонячною мінібатареєю (СМБ) (котра має ФП з $S = 5,76 \text{ см}^2$, спряжена термопастою з тепловим колектором і розташована у СМП оптимального напрямку з $B = 0,2$ Тл, яке підвищує ККД ЛЗ СМБ не менше, ніж в 1,1 рази) та фотоенергетичної установки (ФЕУ), головними складовими якої є: такий ЛЗ ФМНГ, фасетний дзеркальний концентратор, що забезпечує на фотоприймальній поверхні СМБ ступінь концентрації $K_B = 120$, й система примусового водоохолодження, яка дозволяє підтримувати робочу температуру СМБ на рівні 43-45 °С та поряд з електричною енергією додатково отримувати низькопотенційну теплову енергію.

8. Розроблений ЛЗ ФЕУ став прототипом при створенні в НТУ «ХП» дослідного промислового зразка ФЕУ, який у відповідності до проведених розрахунків спроможний забезпечити перетворення річного прямого потоку сонячної енергії в умовах Криму (1350 кВт·год/м²) у 820 кВт·год електричної енергії та у 1611 кВт·год низькопотенційної теплової енергії при площі апертури дзеркального фасетного концентратора 2,75 м² й $K_B = 500$ на фотоприймальній поверхні СМБ з $S = 55 \text{ см}^2$, що при ККД останньої до 26 % у однорідному СМП обумовлює її максимальну корисну потужність до $P_{\text{СМБ}} = 500$ Вт. За вказаними вище параметрами СМБ граничне відношення $P_{\text{СМБ}}$ до її маси сягає 40 кВт/кг, а питома потужність СМБ наближується до 90 кВт/м². При цьому витрата монокристалічного кремнію на один ФМНГ з такою СМБ приблизно в 100 разів менша, ніж для вітчизняних серійних кремнієвих сонячних модулів аналогічної потужності, що є надійною передумовою для суттєвого зниження вартості електричної енергії, отримуваної за допомогою ФМНГ на основі СМБ відповідної конструкції, розташованої у СМП з $B \geq 0,2$ Тл.

ОСНОВНІ ПУБЛІКЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

1. Кириченко М.В. Прогрессивные методы повышения и контроля времени жизни неравновесных неосновных носителей заряда в базовых кристаллах для высокоэффективных кремниевых фотоэлектрических преобразователей / М.В. Кириченко, **Р.В. Зайцев**, В.Р. Копач // Радиопизика и электроника. – 2009. – Т. 14. – № 2. – С.183-190.
2. **Зайцев Р.В.** Вплив стаціонарного магнітного поля на ефективність роботи кремнієвих фотоелектричних перетворювачів / **Р.В. Зайцев**, В.Р. Копач, М.В. Кіріченко, Г.С. Хрипунов // Нові технології. – 2010. – № 1. – С. 20-26.
3. Kirichenko M.V. Advanced methods of increasing and monitoring the lifetime of nonequilibrium minority charge carriers in master dies for high-performance silicon solar cells / M.V. Kirichenko, **R.V. Zaitsev**, V.R. Kopach // Telecommunications and radio engineering. – 2010. - Vol. 69. - No. 5. – P. 441 – 450.
4. **Зайцев Р.В.** Залежність ККД кремнієвих фотоелектричних перетворювачів після обробки стаціонарним магнітним полем від його індукції / **Р.В. Зайцев**, В.Р. Копач, М.В. Кіріченко, О.О. Ткаченко, Г.С. Хрипунов // Технічна електродинаміка: Тематичний випуск «Силова електроніка та енергоефективність». - 2010. - Ч. 2. - С. 283-286.
5. Копач В.Р. Удосконалення та застосування багатоперехідних кремнієвих фотоелектричних перетворювачів з вертикальними діодними комірками / В.Р. Копач, М.В. Кіріченко, **Р.В. Зайцев**, Н.В. Куца, Г.О. Лук'янова, Г.С. Хрипунов // Технічна електродинаміка: Тематичний випуск «Силова електроніка та енергоефективність». - 2010. - Ч. 2. - С. 289-292.
6. **Zaitsev R.V.** Single-crystal silicon solar cells efficiency increase under the influence of magnetic field / **R.V. Zaitsev**, V.R. Kopach, M.V. Kirichenko, E.O. Lukyanov, G.S. Khrypunov, V.N. Samofalov // Functional Materials. – 2010. - Vol. 17. – No. 4. – P. 554-557.
7. Сокол Е.И. Физико-технические особенности и предельные практические возможности фотоэнергетического модуля нового поколения на территории Украины / Е.И. Сокол, В.Р. Копач, **Р.В. Зайцев**, М.В. Кириченко, А.В. Мериуц, Г.С. Хрипунов // Відновлювана енергетика. – 2011. – № 2. – С. 18-28.
8. **Zaitsev R.V.** Dependence of minority charge carriers lifetime on point defects type and their concentration in single-crystal silicon / **R.V. Zaitsev**, V.R. Kopach, M.V. Kirichenko, A.N. Doroshenko, G.S. Khrypunov // Functional Materials. – 2011. – Vol. 18. – No. 4. – P. 497-503.
9. Хрипунов Г.С. Влияние длительного хранения и напряжения прямой полярности на КПД пленочных солнечных элементов на основе CdS/CdTe / Г.С. Хрипунов, В.Р. Копач, А.В. Мериуц, **Р.В. Зайцев**, М.В. Кириченко, Н.В. Дейнеко // Физика и техника полупроводников. – 2011. - Т. 45. – Вып. 11. – С. 1564 – 1570.
10. Кіріченко М.В. Світлодіодний освітлювач / М.В. Кіріченко, **Р.В. Зайцев**, В.Р. Копач, Г.С. Хрипунов, Г.В. Лісачук // Патент на корисну модель № 33676. Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на винаходи

10.07.2008. Дата публікації відомостей про видачу патенту та номер бюлетеня 10.07.2008, Бюл. № 13.

11. **Зайцев Р.В.** Спосіб підвищення ККД монокристалічного кремнієвого фотоелектричного перетворювача / **Р.В. Зайцев**, В.Р. Копач, М.В. Кіріченко, Г.С. Хрипунов, Г.В. Лісачук // Патент на корисну модель № 60406. Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на винаходи 25.06.2011. Дата публікації відомостей про видачу патенту та номер бюлетеня: 25.06.2011, Бюл. № 12.

12. Сокол Є.І. Фотоенергетичний модуль нової генерації / Є.І. Сокол, В.Р. Копач, **Р.В. Зайцев**, М.В. Кіріченко, А.В. Меріуц, Г.С. Хрипунов // I Міжнародна науково-практична конференція «Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка». – 2011. – Україна, Кременчук. – С.41-43.

13. **Зайцев Р.В.** Еволюція часу життя нерівноважних носіїв заряду в кремнієвих фотоелектричних перетворювачах під дією магнітного поля / **Р.В. Зайцев**, В.Р. Копач, М.В. Кіріченко // V Українська наукова конференція з фізики напівпровідників. – 2011. – Україна, Ужгород. – С. 193.

14. **Зайцев Р.В.** Вимірювальний комплекс на основі вдосконаленого компенсаційного методу для атестації кремнієвих фотоелектричних перетворювачів / **Р.В. Зайцев**, М.В. Кіріченко, В.Р. Копач, Л.В. Глебова // I Міжнародна наукова конференція «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах». – 2011. – Україна, Вінниця. – С. 173.

15. **Зайцев Р.В.** Применение магнитного поля для повышения эффективности фотоэлектрического преобразования солнечной энергии / **Р.В. Зайцев**, М.В. Кириченко, Е.А. Лукьянов, В.Р. Копач, Г.С. Хрипунов // Возобновляемые источники энергии: Материалы восьмой всероссийской научной молодежной школы с международным участием – М.: Университетская книга, 2012, с. 124-127.

Зайцев Р.В. Застосування магнітного поля для підвищення ККД кристалічних кремнієвих фотоелектричних перетворювачів. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла. – Інститут електрофізики і радіаційних технологій НАН України, Харків, 2013.

Визначено способи обробки одноперехідних кристалічних кремнієвих фотоелектричних перетворювачів (*Si*-ФЕП) з горизонтальною діодною структурою в стаціонарному магнітному полі (СМП), які забезпечують підвищення їх ККД у 1,1-1,4 рази за рахунок збільшення переважно густини струму короткого замикання, що зумовлено експериментально зафіксованим зростанням часу життя нерівноважних неосновних носіїв заряду у базових кристалічних шарах таких приладів з-за зниження концентрації рекомбінаційних центрів усередині цих шарів під дією однорідного і неоднорідного СМП. Вперше експериментально виявлено, що при орієнтації вектору магнітної індукції \vec{B} однорідного СМП паралельно до опромінюваної поверхні багатоперехідних (БП) *Si*-ФЕП з вертикальними діодними комірками (ВДК) та під кутом 90° до вектору густини фотоструму при погляді з боку прямого надходження випромінювання незалежно від величин

B , коефіцієнту концентрації сонячного випромінювання K_B і температури T відбувається максимальне підвищення ККД таких приладів зі зростанням B у порівнянні з випадком протилежного напрямку \vec{B} . Ефект підвищення ККД для БП Si-ФЕП у СМП з оптимальним напрямком \vec{B} і $B = 0,2$ Тл є найбільш вагомим при 24 ± 1 °С й $56 \leq K_B \leq 300$ в режимі прямого опромінювання їх фронтальної поверхні і одночасно дзеркального опромінювання їх тилової поверхні, завдяки якому під дією стаціонарного магнітного поля ККД, що за умов таких K_B і T при $B = 0$ має максимальне початкове значення на рівні 23-25 %, зростає на 1,1-2,2 % з середньою швидкістю до 7,4 %/Тл. Доведено, що це обумовлено ініціюванням магнітним полем процесу розділення генерованих світлом електронно-діркових пар, а також внеском дії сили Лоренца у не дифузійну складову транспорту фотогенерованих електронів і дірок при їх прямуванні відповідно до n^+ - й p^+ -шарів ВДК. З урахуванням зазначених ефектів розроблено і створено фотоенергетичний модуль нової генерації та фотоенергетичну установку (ФЕУ) на основі примусово охолоджуваних БП Si-ФЕП, принциповою відмінною особливістю якого є розташування виготовленої з БП Si-ФЕП сонячної мінібатареї (СМБ) в однорідному СМП оптимального напрямку, котре створюється постійними магнітами та дозволяє підвищити ККД СМБ не менше, ніж в 1,1 рази при $B = 0,2$ Тл. Така ФЕУ надає можливість поряд з електричною енергією додатково отримувати низькопотенційну теплову енергію.

Ключові слова: кремнієвий фотоелектричний перетворювач, фотоенергетичний модуль нової генерації, стаціонарне магнітне поле, фотоенергетична установка, ККД.

Zaitsev R.V. The application of magnetic field for crystalline silicon solar cells efficiency increase. – Manuscript. Thesis for a PhD degree in technical sciences by specialty 01.04.07 – solid state physics. – Institute of electrophysics & Radiation technologies NAS of Ukraine, Kharkiv, 2013.

It has been determined the ways of one-junction crystalline silicon solar cells (Si-SC) with horizontal diode structure treatment in a stationary magnetic field (SMF), increasing their efficiency in 1.1-1.4 times mainly due to the increase of short circuit current density, which is caused by experimentally fixed increasing of nonequilibrium minority charge carriers lifetime in the base crystalline layers of such devices as a result of recombination centers concentration within these layers reduction under influence of homogeneous and heterogeneous SMF. Firstly experimentally established that at the orientation of the homogeneous SMF magnetic induction vector \vec{B} parallel to the illuminated surface of multi-junction (MJ) Si-SC with vertical diode cells them (VDC) and at the 90° angle to the photocurrent density vector when viewed from side of direct illumination incidence regardless from values B , solar radiation concentration ratio K_B and temperature T the such devices efficiency increase with rising B is maximally in comparison with the case of opposite \vec{B} direction. The effect of efficiency increase for MJ Si-SC in SMF with optimal \vec{B} direction and $B = 0.2$ T is the most significant at 24 ± 1 °C and $56 \leq K_B \leq 300$ due to using front surface direct illumination simultaneously with rear surface mirror illumination. Under stationary magnetic field the efficiency, that on condition of such K_B and T at $B = 0$ has a maximum initial value at 23-25 %, increase on 1.1-2.2 % with an average

speed of 7.4 %/T. It is shown, that this due to initiation by magnetic field the light generated electron-hole pairs separation process, and also the contribution of the Lorentz force in no diffusion component of photogenerated electrons and holes transport in their movement to the n^+ - and p^+ layers of VDC, respectively. In respect these effects it has been developed and manufactured a new generation photoenergy module and photovoltaic system based on forcibly cooled MJ Si-SC, the principal distinguishing feature of which is the location of solar minibattery, made from MJ Si-SC, in optimal direction homogeneous SMF, which creates by permanent magnets and allow to improve solar minibattery efficiency not less than 1.1 times at $B = 0.2$ T. Such photovoltaic system enables to obtain additionally low potential thermal energy along with electricity.

Key words: silicon solar cell, stationary magnetic field, photovoltaic system, efficiency

Зайцев Р.В. Применение магнитного поля для повышения КПД кристаллических кремниевых фотоэлектрических преобразователей. - Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 01.04.07 – физика твердого тела. – Институт электрофизики і радиационных технологий НАН Украины, Харьков, 2013.

Определены способы обработки однопереходных кристаллических кремниевых фотоэлектрических преобразователей (*Si-ФЭП*) с горизонтальной диодной структурой в стационарном магнитном поле (СМП), которые обеспечивают повышение их КПД в 1,1-1,4 раза за счет увеличения преимущественно плотности тока короткого замыкания, которое обусловлено экспериментально зафиксированным увеличением времени жизни неравновесных неосновных носителей заряда в базовых кристаллических слоях таких приборов из-за снижения концентрации рекомбинационных центров внутри таких слоев под действием однородного и неоднородного СМП. Впервые экспериментально обнаружено, что при ориентации вектора магнитной индукции \vec{B} однородного СМП параллельно к освещаемой поверхности многопереходных (МП) *Si-ФЭП* с вертикальными диодными ячейками (ВДЯ) и под углом 90° к вектору плотности фототока при взгляде со стороны прямого поступления излучения независимо от величин B , коэффициента концентрации солнечного излучения K_B и температуры T происходит максимальное повышение КПД таких приборов с увеличением B по сравнению со случаем противоположного направления \vec{B} . Эффект повышения КПД для МП *Si-ФЭП* в СМП с оптимальным направлением \vec{B} и $B = 0,2$ Тл наиболее существенно проявляется при 24 ± 1 °С и $56 \leq K_B \leq 300$ в режиме прямого освещения их фронтальной поверхности и одновременном зеркальном освещении их тыльной поверхности, благодаря которому под действием стационарного магнитного поля КПД, который при условии таких K_B и T при $B = 0$ имеет максимальное начальное значение на уровне 23-25 %, увеличивается на 1,1-2,2 % со средней скоростью до 7,4 %/Тл. Доказано, что это обусловлено иницированием магнитным полем разделения генерированных светом электронно-дырочных пар, а также вкладом действия силы Лоренца в недиффузионную составляющую транспорта фотогенерированных электронов и дырок при

их следовании соответственно к n^+ - и p^+ -слоям ВДЯ. С учетом указанных эффектов разработан и создан фотоэнергетический модуль новой генерации (ФМНГ) и фотоэнергетическая установка (ФЭУ) на основе принудительно охлаждаемых МП Si-ФЭП, принципиальной отличительной особенностью которого является размещение изготовленной из МП Si-ФЭП солнечной минибатареи (СМБ) в однородном СМП оптимального направления, которое создается постоянными магнитами и позволяет повысить КПД СМБ не менее, чем в 1,1 раза при $B = 0,2$ Тл. Такая ФЭУ позволяет наряду с электрической энергией дополнительно получать низкопотенциальную тепловую энергию.

Ключевые слова: кремниевый фотоэлектрический преобразователь, стационарное магнитное поле, фотоэнергетическая установка, КПД