

**Фізико-технічні основи конструктивно-технологічних рішень сонячних елементів на нанокристалічних кремнієвих плівках з використанням рідкісноземельних елементів та гетероструктурах  $A_3B_5$**

**Физико-технические основы конструктивно-технологических решений солнечных элементов на нанокристаллических кремниевых пленках с использованием редкоземельных элементов и гетероструктурах  $A_3B_5$**

**Physical-technical principles of the constructional and technological solutions on the thin-film nanocrystalline silicon solar cells and heterojunction  $A_3B_5$  solar cells**

1. **Номер державної реєстрації теми - 0113U002306, номер реєстрації в університеті – 2670-ф**
2. **Науковий керівник-** д.т.н., проф. Якименко Ю. І., Якименко Ю. И., Yakymenko Yu. I.
3. **Суть розробки, основні результати.**

**(укр.)**

Комплексна оптимізація технології виготовлення радіаційно-стійких сонячних елементів на гетероструктурах  $A_3B_5$ , на монокристалічному кремнії та на нанокристалічних кремнієвих плівках, легованих рідкісноземельними елементами, сформованих методом синтезу кремнієвих нанокристалічних тонкоплівкових шарів. Розроблені і практично реалізовані технологічні операції виготовлення високоефективних радіаційно-стійких кремнієвих нанокристалічних тонкоплівкових та гетероструктурних  $A_3B_5$  сонячних елементів. Виготовлено радіаційно-стійкі сонячні елементи, які за сукупністю економічних, вихідних та експлуатаційних параметрів не поступаються існуючим світовим аналогам.

Розроблено модель входження рідкісноземельних домішок у нанокристалічний кремній для легування плівок з метою підвищення їх фоточутливості. Це дозволяє більш точно розраховувати технологічні режими та збільшує загальну контрольованість процесу легування. Створені методики досліджень кристалічної структури, електрофізичних та оптичних властивостей плівкових шарів та фотоелектричних властивостей сонячних елементів на їх основі, а також процесу масопереносу на інтерфейсі та еволюції концентраційних розподілів основних елементів і домішок по товщині шаруватих плівкових систем “метал-кремній” та “метал - гетероструктура  $A_3B_5$ ”.

Комплексність підходу до досліджень та розробки технології виготовлення радіаційно-стійких СЕ, дозволила укомплектувати виготовленими СЕ сонячні батареї першого наносупутник НТУУ «КПІ» “PolyITAN-1”, який успішно функціонує на навколоземній орбіті півтора року.

**(рос.)**

Комплексная оптимизация технологии изготовления радиационно-стойких солнечных элементов на гетероструктурах  $A_3B_5$ , на монокристаллическом кремнии и на нанокристаллических кремниевых пленках, легированных редкоземельными элементами, сформированных методом синтеза кремниевых нанокристаллических тонкопленочных слоев. Разработаны и практически реализованы технологические операции изготовления высокоэффективных радиационно-стойких кремниевых нанокристаллических тонкопленочных и гетероструктурных  $A_3B_5$  солнечных элементов. Изготовлены радиационно-стойкие солнечные элементы, которые по совокупности экономических, выходных и эксплуатационных параметров не уступают существующим мировым аналогам.

Разработана модель вхождения редкоземельных примесей в нанокристаллический кремний для легирования пленок с целью повышения их фоточувствительности. Это позволяет более точно рассчитывать технологические режимы и увеличивает общую контролируемость процесса легирования. Созданы методики исследования

кристаллической структуры, электрофизических и оптических свойств пленочных слоев и фотоэлектрических свойств солнечных элементов на их основе, а также процесса массопереноса на интерфейсе и эволюции концентрационных распределений основных элементов и примесей по толщине слоистых пленочных систем "металл-кремний" и "металл-гетероструктура  $A_3B_5$ ".

Комплексность подхода к исследованиям и разработке технологии изготовления радиационно-стойких СЭ позволила укомплектовать произведенными СЭ солнечные батареи первого наноспутника НТУУ «КПИ» "PolyITAN-1", который успешно функционирует на околоземной орбите полтора года.

(англ.)

Integrated optimization of production technology of radiation-resistant solar cells based on the  $A_3B_5$  heterojunctions, on the single-crystal silicon as well as on the nanocrystalline silicon films doped with rare earth elements formed by the method of synthesis of nanocrystalline silicon thin-film layers. Technological operations for manufacturing of high-performance radiation-resistant nanocrystalline silicon thin film solar cells and the  $A_3B_5$  heterojunction solar cells have been developed and practically realized. The radiation-resistant solar cells were manufactured, which in the sum of the economic, output and operational parameters are not inferior to the existing world analogues.

A model on the propagation of the rare earth impurities in the nanocrystalline silicon was developed for doping of films for photosensitivity increasing. This allows a more accurate calculation of technological regimes and increases the overall controllability of the doping processes. Procedures for the study of the crystal structure, electrical and optical properties of the thin layers and photoelectric properties of solar cells based on them have been developed, as well as for study the process of mass transfer at the interface and the evolution of the concentration distribution of the main elements and impurities on the thickness of the layered film systems "metal-silicon" and "metal-heterojunction  $A_3B_5$ ".

An integrated approach of research and development of the manufacturing technology of the radiation-resistant solar cells has allowed the equipping of the solar panels of the "PolyITAN-1" – the first nanosatellite of the NTUU «KPI» with produced solar cells. "PolyITAN-1" is successfully operating on the Earth orbit for year and a half.

#### **4. Наявність охоронних документів на об'єкти права інтелектуальної власності.**

Немає.

#### **5. Порівняння зі світовими аналогами.**

Результати роботи відповідають світовому рівню, ефективність отриманих елементів знаходиться на рівні світових аналогів, а модель входження рідкоземельних елементів у нанокристалічний кремній не має аналогів у світовій практиці інженерії тонкоплівкових матеріалів.

#### **6. Економічна привабливість для просування на ринок**

Застосування розроблених технологій та модернізованого технологічного обладнання дозволяє значно знизити собівартість та підвищити якість сонячних елементів за рахунок:

- підвищення на 20–25 % ефективності тонкоплівкових СЕ в результаті синтезу структурного різновиду тонкої кремнієвої плівки – нанокремнію, що представляє собою аморфну матрицю з розподіленими в ній нанокристалітами;

- підвищення на 20–30 % радіаційної стійкості тонкоплівкових СЕ в результаті введення рідкісноземельних металів до складу кремнієвої плівки, які виступатимуть в першу чергу в ролі сенсibilізаторів чутливості матеріалу;

- підвищення на 15-20% радіаційної стійкості СЕ з монокристалічного кремнію в результаті оптимізації технології їх виготовлення та вибору матеріалу напівпровідника.

## **7. Потенційні користувачі (галузі, міністерства, підприємства, організації).**

Рекомендована галузь застосування: сонячна енергетика, матеріалознавство, фотоприймачі і фотоелектричні перетворювачі, комунікації та зв'язок. Відпрацьовані при виконанні проекту способи та технології можуть бути ефективно використані для створення нових приладів, перетворювачів та сенсорів на основі функціональних матеріалів в електронних системах та пристроях.

Перспективним може також бути використання розроблених фотоелектричних перетворювачів у безпілотних літальних апаратах у т.ч. стратосферних.

В Україні потенційними споживачами одержаних результатів є ПАТ «Квazar» (м. Київ), НДІ НАНУ «Мікроприлад» (м. Київ), завод «Комунар» (м. Харків). У космічній галузі – на державному підприємстві «Науково-дослідний інститут приладобудування» (м. Харків), НКАУ.

Конструктивно-технологічні рішення матеріало- та енергозберігаючих плівкових та нанокристалічних СЕ на основі нанокристалічних кремнієвих плівок і плівкових систем “метал - гетероструктура  $A_3B_5$ ” при умові захищення їх патентами, можуть бути запропоновані для ліцензування та подальшого продажу ліцензій закордонним виробникам плівкових на монокристалічних СЕ, наприклад таким німецьким фірмам як SIMENS ANTEC, ARCO SOLAR, європейському та американському космічним агенціям.

## **8. Стан готовності розробки.**

Розроблено та виготовлено оснащення для модернізації устаткування для проведення технологічних процесів для виготовлення фотоелектричних структур на плівках нанокристалічного кремнію з РЗМ включеннями, на монокристалічному кремнії та на гетеропереходах  $A_3B_5$ , відпрацьовані відповідні технології і розроблені технологічні рекомендації щодо ефективного застосування експериментального обладнання.

Розроблені і виготовлені робочі зразки фотоелектричних перетворювачів на плівках нанокристалічного кремнію з РЗМ включеннями, на монокристалічному кремнії та на гетеропереходах  $A_3B_5$ .

Розроблені і виготовлені радіаційно-стійкі ФЕП на монокристалічному кремнії для використання у бортовій системі енергозабезпечення малогабаритного супутника класу CubeSAT.

## **9. Існуючі результати впровадження.**

Розробленими радіаційно-стійкими фотоелектричними перетворювачами укомплектовано сонячні батареї першого наносупутника НТУУ «КПІ» “PolyITAN-1”, який успішно функціонує на навколосемній орбіті з 19 червня 2014 року.

**10. Форма участі інвестора** (яка краща форма участі в реалізації результатів проекту інвестора: частка в проекті %, частка від прибутку %, інше)

**11. Обсяг інвестицій** (необхідна для результатів проекту сума інвестицій у доларах США).

**12. Мета інвестицій** (розширення бізнесу, створення нового підприємства, інше).

**13. Назва організації, телефон, E-mail**

НТУУ“КПІ”, НДІ «Прикладної електроніки», 204-9074, [iav\\_7@i.ua](mailto:iav_7@i.ua); 236-9676, [bogdan@ee.ntu-kpi.kiev.ua](mailto:bogdan@ee.ntu-kpi.kiev.ua)

**14. Фото розробки**

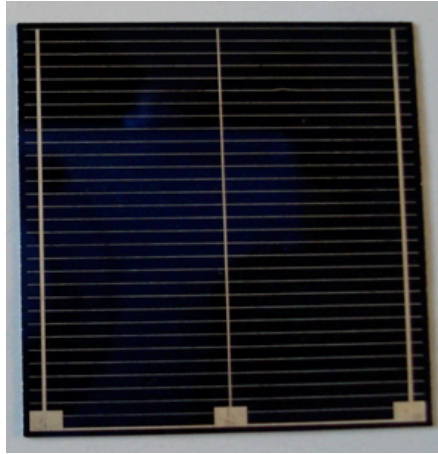


Рис. 1. Фотографія ФЕП на основі гетеропереходу AlGaAs/GaAs

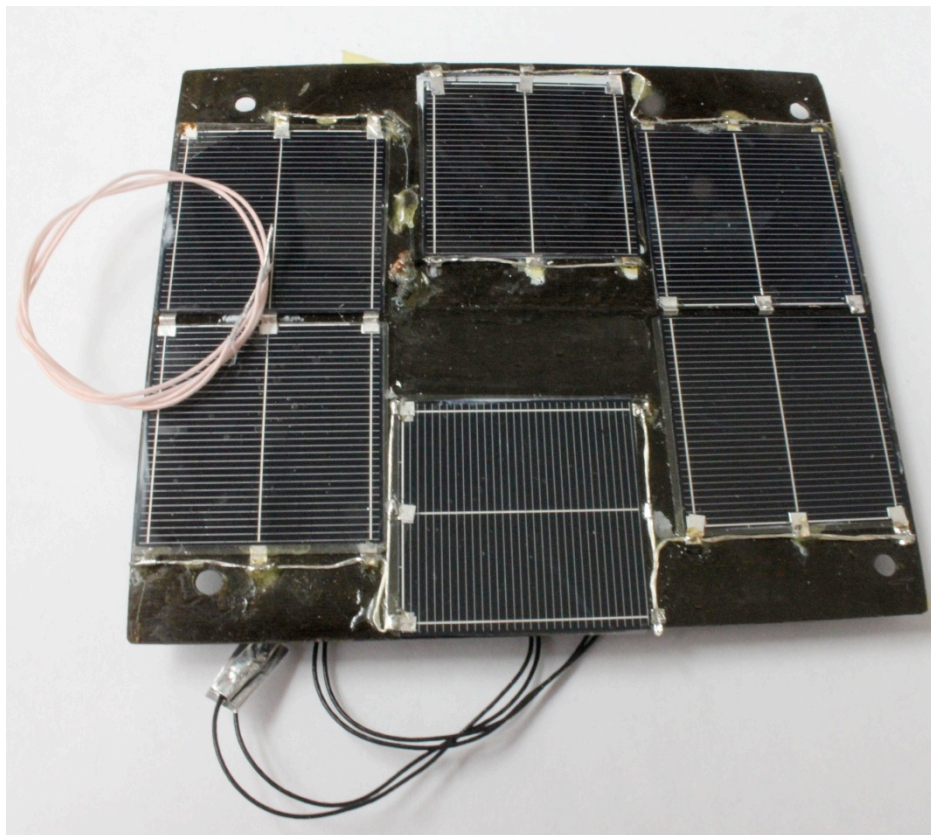


Рис. 2. Фотографія однієї з п'яти сонячних батарей супутника "PolyTAN-1" з ФЕП на монокристалічному кремнії

### 15. Перелік публікацій за матеріалами досліджень за період виконання розробки

1 V.M. Koval, Y.V. Yasiievych, M.G. Dusheiko, A.V. Ivashchuk, O.V. Bogdan, Y.I. Yakymenko Optical properties of silicon nanocomposites containing rare earth metals // Nanopages. № 8, 2013, pp. 9 – 16.

2 Хрипунов Г.С., Сокол Е.И., Якименко Ю.И., Мериуц А.В., Иващук А.В., Шелест Т.Н./ Преобразование солнечной энергии с использованием комбинации фотоэлектрических преобразователей с базовыми слоями CdTe и CuInSe2 // Физика и техника полупроводников, 2014, том 48, вып.12, pp. 1671 – 1675.

3 Koval V.M., Yasievich Y.V., Ivashchuk A.V., Yakymenko Y.I., Fadiiev M.S., Bushueva O.O., Heterojunction Solar Cells with Nanostructured Silicon Thin Films Containing

Yttrium Impurities. Proceedings of the IEEE XXXIV International Scientific Conference Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, 2014, pp. 90-92.

4. Getman A.V., Dushejko M.G., Ivashchuk A.V., Fadieiev M.S., Yakymenko Y.I., Influence of the Carrier Lifetime on the Silicon Solar Cells Radiation Resistance. Proceedings of the IEEE XXXIV International Scientific Conference Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, 2014, pp. 227-229.

5. M.V. Dranchuk, A.I. Ievtushenko, V.A. Karpyna, O.S. Lytvyn, V.R. Romanyuk, V.M. Tkach, V.A. Baturin, O.Y. Karpenko, V.M. Kuznetsov, V.I. Popovych, M.G. Dusheyko, G.V. Lashkarev Effect of substrate temperature on structural and electrical properties of Al-doped zinc oxide thin films deposited by layer-by-layer method at magnetron sputtering// Sensor Electronics and Microsystem Technologies. - 2015. – V. 12, № 1. – P. 5-12.

6. A. I. Ievtushenko, V. A. Karpyna, V. I. Popovych, O. S. Lytvyn, V. R. Romanyuk, V. M. Tkach, V. A. Baturin, O. Y. Karpenko, V. M. Kuznetsov, M. V. Dranchuk, M. G. Dusheyko and G. V. Lashkarev Effect of magnetron power on properties of ZnO:Al thin films deposited by layer-by-layer method in magnetron sputtering // Nanostructural Materials Science. – 2015. – 1. – P. 43-49.

7. Гетьман А.В., Душейко М.Г., Іващук А.В., Фадєєв М.С., Якименко Ю.І., Радіаційна стійкість кремнієвого фотоперетворювача // Електроніка та зв'язок, том 20, №2 (85), 2015. – С. 23-26.

#### **16. Ключові слова до розробки**

Сонячний елемент, фотоелектричний перетворювач, монокристалічний кремній, нанокристалічні кремнієві плівки, GaAs,  $A_3B_5$ , рідкісноземельні елементи, космічна галузь, технологія.