

## ЕВТЕКТИЧНИЙ МЕХАНІЗМ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОГО ФОРМУВАННЯ ПЛІВКОВОГО НАНОКРЕМНІЮ

В.Б. Неймаш<sup>1</sup>, П.С. Шепелявий<sup>2</sup>, В.О. Юхимчук<sup>2</sup>, О.М. Кабалдін<sup>2</sup>, В.В. Мельник<sup>1,3</sup>, А.Г. Кузміч<sup>3</sup>, О. Гуща<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>Інститут фізики НАН України, пр. Науки, 46, Київ, 03028, *e-mail: neimash@gmail.com*

<sup>2</sup>Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України, пр. Науки, 41, м. Київ, 03028, Україна, *e-mail: yukhym@isp.kiev.ua*

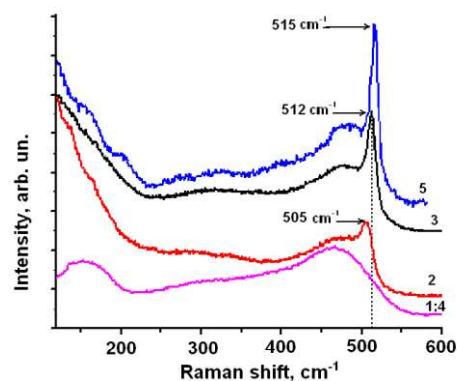
<sup>3</sup>Київський національний університет ім. Т.Г.Шевченка, вул. Володимирська, 60, м. Київ, 01601, Україна, *e-mail: viktor.melnyk@meta.ua*

<sup>4</sup>NuPortSoft, 21 Nopalitos Way, Aliso Viejo, CA 92656, USA, *e-mail: goushcha@nuportsoft.com*

**Вступ.** Тонкі плівки нанокристалічного кремнію (nc-Si) вважаються перспективним матеріалом для виробництва сонячних елементів (СЕ). Це зумовлено унікально вдалим поєднанням в ньому позитивних і відсутності негативних для фотоелектрики властивостей аморфного (a-Si) і кристалічного (c-Si) кремнію. А саме – nc-Si, як і a-Si поглинає світло по прямо-зонному механізму, тобто на 2 порядки ефективніше, ніж непрямо-зонний c-Si. Тому як і в a-Si повне поглинання сонячного світла відбувається в шарі nc-Si товщиною  $\sim 1$  мкм на відміну  $\sim 100$  мкм у c-Si. Відповідно зменшуються витрати Si на виготовлення СЕ. Принциповим недоліком СЕ на a-Si порівняно з СЕ із c-Si є поступова деградація ефективності під впливом світла внаслідок ефекту Стеблера-Вронського. У nc-Si цього ефекту немає завдяки відсутності технологічного водню для компенсації обірваних зв'язків. Залежність ширини забороненої зони ( $E_g$ ) від розміру кристалітів робить nc-Si екологічною альтернативою широко-зонним напівпровідникам типу  $A_{III}B_V$ . Крім того, наявність морфологічно однотипних нано-кремнієвих матеріалів з різною  $E_g$  суттєво спрощує задачу виготовлення СЕ каскадного типу з теоретичною межею ефективності 87%. Наразі проблема полягає у відсутності достатньо ефективних і дешевих технологій виготовлення плівок nc-Si з керованим доміантним розміром кристалітів в інтервалі 1-5 нм, в якому максимально реалізуються розмірні ефекти. Одним з підходів до вирішення цієї задачі є застосування індукованої металом кристалізації (ІМК) a-Si при низьких температурах [1]. Зокрема, шляхом легування a-Si домішкою Sn [2, 3] із газової фази вдалося виготовити при температурі 300 °С плівки аморфно-кристалічного композиту nc-Si/a-Si з доміантним розміром кристалітів Si від 2 до 4 нм, які займають від 20 до 80% об'єму композиту. Автори роботи [3] запропонували конкретний механізм ІМК a-Si, легованого оловом, через циклічне утворення і розпад евтектичного розчину Si у мікроскопічних краплинах рідкого Sn в об'ємі плівки. Експериментальний перевірки цього механізму присвячена дана робота.

**Мета роботи** – експериментальна перевірка механізму ІМК a-Si, легованого оловом, шляхом формування і термообробки (ТО) макроскопічного інтерфейсу a-Si/Sn.

**Матеріал і результати дослідження.** Шляхом 3-етапного осадження на скляну підкладку



Si і Sn, термічно розпилених у вакуумі, сформована 3-шарова плівкова структура, Si/Sn/Si, яку досліджували до і після ТО при різних температурах. Товщина кожного шару по 100 нм. Спектри комбінаційного розсіювання на поверхні структури (рис.1) показали наявність нанокристалів Si, розмір і концентрація яких ростуть з температурою ТО.

Fig. 1 – Raman spectra of a-Si (1; 4) and Si/Sn/Si stack (2; 3; 5) as deposited (1; 2), after HT at 300C (3; 4) or 400C (5)

Розподіл концентрації по товщині структур до (а) і після ТО (б) показано на рис. 2.

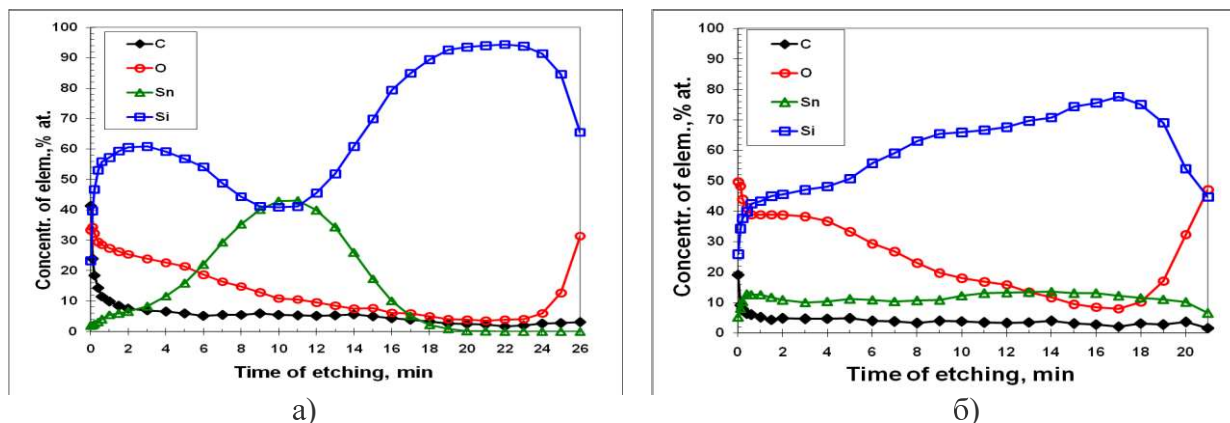


Fig. 2 – Concentration profile in as deposit and heat treated at 300 °C Si/Sn/Si stack

Електронно-мікроскопічне зображення поверхні структур до і після ТО показано на рис.3.

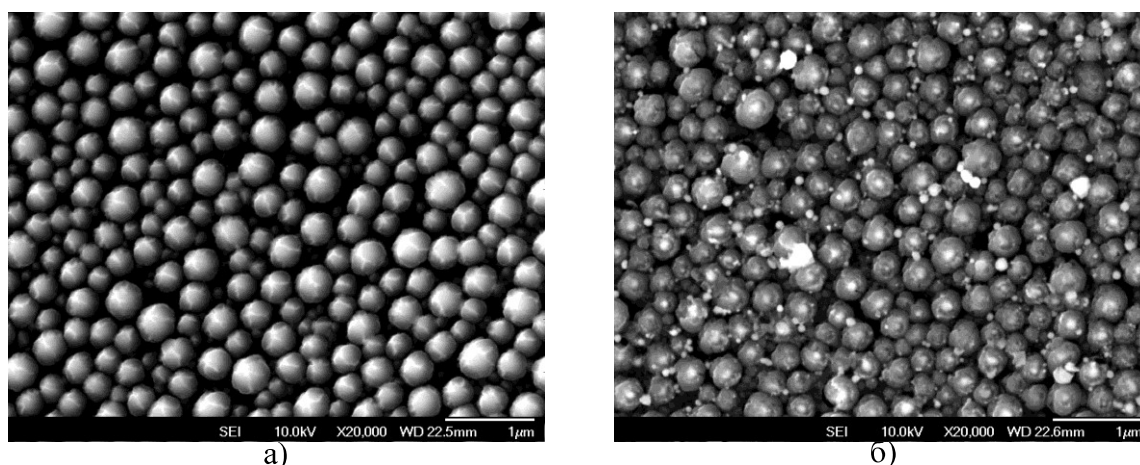


Fig. 3 – SEM-image of Si/Sn/Si stack as deposit and after HT at 300C

Результати проаналізовано у порівнянні з відповідними літературними даними.

**Висновки.** Отримані результати прямо підтверджують гіпотезу [3] про механізм формування плівкового нанокремнію шляхом індукованої оловом кристалізації аморфного кремнію. Дія легування оловом із газової фази полягає у: 1) виникненні мікроскопічних крапель металевого Sn в об'ємі аморфного Si; 2) розчиненні кремнію в краплях при температурах вище плавлення Sn з утворенням обмінного (атомами Si і Sn) шару евтектики; 3) циклічних процесах розпаду і доутворення розчину Si в Sn у евтектичному шарі, наслідком яких є розчинення аморфного і осадження нанокристалічного Si. Процеси за пунктами 2) і 3), є загальним механізмом індукованої оловом трансформації кремнію із аморфного у кристалічний стан. Цей механізм не залежить від форми і масштабу інтерфейсу між a-Si і Sn: сендвіч плівок Si і Sn [1] чи мікроскопічні [3] або макроскопічні як у цій роботі вкраплення Sn в a-Si. Показано можливість сильного зменшення відбивання світла поверхнею нанокристалічних кремнієвих плівок шляхом їх осадження на шар металевого Sn.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Mohiddon A. Metal Induced Crystallization. in Crystallization / A. Mohiddon, G. Krishna // Science and Technology, edited by Marcello Rubens Barsi Andreetta. – 2012. – pp.461-480.
2. V.B. Neimash, V.M. Poroshin, O.M. Kabaldin, P.E. Shepelyaviy, V.O. Yukhymchuk, V.A. Makara, S.U. Larkin, Ukr. J. Phys. – 58, 865 (2013).
3. V. Neimash, V. Poroshin, P. Shepeliaviy, V. Yukhymchuk, V. Melnyk, A. Kuzmich, V. Makara, A. Goushcha. Tin Induced a-Si Crystallization in Thin Films of Si-Sn Alloys // J.Appl.Phys. – 2013. – V.113. – N12. – pp.213104-1 – 21314-6.