

Національна академія наук України  
Міністерство освіти та науки України  
Наукова рада з проблеми «Фізика напівпровідників  
і діелектриків» при Відділенні фізики і астрономії  
Національної академії наук України  
Українське фізичне товариство  
Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України  
Ужгородський національний університет  
Інститут електронної фізики НАН України

*Конференція присвячена 120-річчю  
з дня народження академіка Лашкарьова В.Є. і  
100-річчю з дня народження проф. Чепура Д.В.*

# **ІХ УКРАЇНСЬКА НАУКОВА КОНФЕРЕНЦІЯ З ФІЗИКИ НАПІВПРОВІДНИКІВ УНКФН–9**

## **IX UKRAINIAN SCIENTIFIC CONFERENCE ON PHYSICS OF SEMICONDUCTORS (USCPS-9)**

### **ТЕЗИ ДОПОВІДЕЙ ABSTRACTS**

Ужгород, Україна  
22 - 26 травня 2023

Uzhhorod, Ukraine  
May 22-26, 2023

## Вплив перебудови залізо-вмісних дефектів на параметри кремнієвих сонячних елементів

О.Я. Оліх, О.В. Завгородній

Київський національний університет імені Тараса Шевченка,  
Україна, 01601, місто Київ, вул. Володимирська, 64/13  
olegolikh@knu.ua, [nevermor464@gmail.com](mailto:nevermor464@gmail.com)

Неруйнівні методи діагностики фотоелектричних пристроїв, які, зокрема, характеризують їхній дефектний склад та ґрунтуються на вимірюваннях вольт-амперних характеристик є важливими з точки зору практичного використання та викликають значний інтерес [1,2]. Подібні підходи передбачають існування відомих кількісних співвідношень між параметрами дефектів та особливостями ВАХ. В роботі представлені результати моделювання впливу домішкових атомів Fe на параметри фотоелектричного перетворення кремнієвих сонячних елементів (КСЕ).

З використанням програмного пакету SCAPS 3.3.10 було проведено моделювання кремнієвих структур  $n^+p-p^+$  з різними товщинами бази  $d$  (180-380 мкм), рівнями її легування бором  $N_B$  ( $10^{15}$ - $10^{17}$  см $^{-3}$ ) та концентраціями заліза  $N_{Fe}$  ( $10^{10}$ - $10^{14}$  см $^{-3}$ ) та оцінка величин струму короткого замикання  $I_{sc}$ , напруги розімкнутого кола  $V_{oc}$ , фактору форми FF та ефективності  $\eta$  за умов як сонячного (AM1.5) так і монохроматичного (940 нм, 4 Вт/м $^2$ ) освітлень в діапазоні температур 290-340 К. Різноманіття розглянутих параметрів КСЕ та зовнішніх умов відрізняють цю роботу від низки попередніх досліджень [3-5]. Були розглянуті випадки коли більшість атомів Fe утворюють пари з бором (рівноважний стан) та коли всі вони перебувають у незв'язаному міжвузольному положенні. Основна увага була приділена відносним змінам параметрів після розпаду пар (див. рис.1 та 2) та можливості їхнього використання для визначення концентрації заліза.

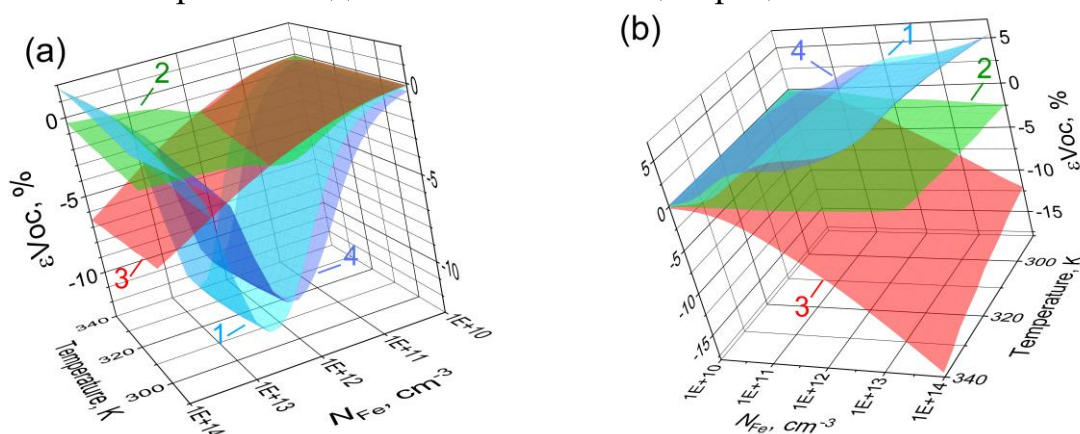


Рис.1. Залежності відносних змін напруги холостого ходу від температури та концентрації заліза при сонячному (а) та монохроматичному (б) освітленні.  $N_B$ , см $^{-3}$ :  $10^{15}$  (поверхні 1, 4),  $10^{16}$  (2),  $10^{17}$  (3);  $d$ , мкм: 180 (1-3), 380 (4).

Виявлено, що при низьких рівнях легування характер зміни  $V_{oc}$  суттєво залежить від місця генерації надлишкових носіїв (див. рис.1.а та б, поверхні 1 та 4). Крім того, в цьому випадку існує залежність  $\varepsilon V_{oc}$  від товщини бази. При AM1.5 достатньо великі зміни напруги холостого ходу (в околі 10%) спостерігаються лише у випадку  $N_{Fe} = (1-5) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ , проте  $\varepsilon V_{oc}$  немотонно залежить від концентрації заліза. При  $N_B \sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$  величини  $\varepsilon V_{oc}$  катастрофічно малі, при зростанні рівня легування спостерігаються монотонні зміни  $\varepsilon V_{oc}$  при змінах концентрації заліза, проте їхня максимальна величина лише біля -7% для AM1.5 та -15% для монохроматичного освітлення. Подібний характер змін спостерігається і для  $\varepsilon FF$ ; проте абсолютні зміни фактору форми менші: наприклад, якщо при освітленні з довжиною хвилі 940 нм для  $\varepsilon V_{oc}$  максимальні зміни очікуються на рівні 17%, то для  $\varepsilon FF$  – лише 5%.

Інша пара параметрів зі схожою реакцією на домішкове залізо – це  $I_{sc}$  та  $\eta$ . Для них обох очікуються монотонні зміни при зростанні  $N_{Fe}$  (при  $N_B \sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$  ці зміни додатні, при більш високих рівнях легування – від’ємні), які слабо залежать від температури – див. рис.2. Більші абсолютні значення спостерігаються при рівномірній генерації носіїв в базі KCE і для  $\eta$ : максимальні значення  $\varepsilon I_{sc}$  та  $\varepsilon \eta$  складають -41% та -50% при AM1.5 та -170% та -210% при 940 нм, відповідно.

Таким чином, зміни  $I_{sc}$  та  $\eta$  KCE після розпаду пар FeV, на відміну від змін  $V_{oc}$  та  $FF$ , можуть бути основою для оцінки концентрації заліза. Зміни  $V_{oc}$  можуть бути лише додатковим параметром, використання якого спрямовано на підвищення точності відповідного методу.

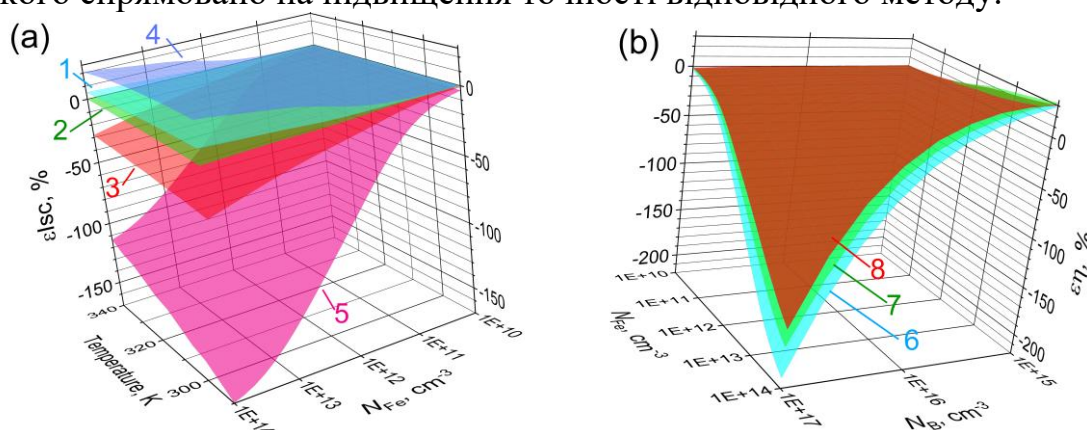


Рис.2. Залежності відносних змін струму короткого замикання (а) та ефективності (б).  $N_B$ ,  $\text{см}^{-3}$ :  $10^{15}$  (1, 4),  $10^{16}$  (2),  $10^{17}$  (3, 5);  $T$ , K: 340 (8), 315 (7), 290 (6); освітлення: AM1.5 (1-3), 940 нм (4-8).  $d = 180 \text{ мкм}$

- [1] R.C. Kurchin, J.R. Poindexter *et al.* IEEE J. Photovolt. 10, 1532 (2020)
- [2] O. Olikh, O. Lozitsky, O. Zavhorodnii. Prog. Photovolt. Res. Appl. **30**, 648 (2022)
- [3] J. Schmidt. Prog. Photovolt. Res. Appl. **13**, 325 (2005)
- [4] M. Schubert, M.Padilla *et al.* Sol. Energy Mater. Sol. Cells **138**, 96 (2015)
- [5] A. Hajjiah *et al.* Sol. Energy Mater. Sol. Cells **211**, 110550 (2020)