

ISSN 1335-2237 str.68, Bratislava. 8. Kondoh Z., Yokota S. Micro in-pipe mobile machines by making use of an electro-rheological fluid. *Proceeding IROS 97* pp. 1672-1677. 9. Maeda S., Tohyama O., Ito H.: Micro Actuators with Shape Memory Alloy (SMA) Coil Springs and their Application to Active Fiberscopes. *IEICE Trans. Aelectron.*, Vol. E80-C, No. 2. Feb. 1997. Pp. 226-231. 10. Suzuki M.: Polymer Gels as a New Driving Source for Robotics, Micromachines and Biomedical Applications. *Int. J. Japan Soc. Prec. Eng.*, Vol. 25. No. 3 Sept. 1991. Pp 169-174. 11. Teshigahara A., Watanabe M., Kawahara N., Ohtsuka Y., Hattori T.: Performance of a 7-mm microfabricated car. *Journal of Micromechanical Systems*, Vol. 4. No. 2, June 1995. Pp. 76-80. 12. Trimmer W., Jebens R.: Actuators for Micro Robots. *Proceeding 1989 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Scottsdale, AZ, 1988. Pp. 1547-1552. 13. Yoshida K., Mawarari H., Yokota S.: An in-pipe mobile micromachine using fluid power traversable branched pipes. *Fluid power 3th JHPS Internatioanl Symposium on Fluid Power Yokohama 4-6 Nov.* Pp. 229-234.

УДК 621. 319

А.П. Кудін

Національний педагогічний університет імені М.П. Драгоманова, Київ

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЕВОЛЮЦІЇ ДЕФЕКТНОЇ СТРУКТУРИ
ОПРОМІНЕНИХ КРИСТАЛІВ α -ZnP₂
МЕТОДОМ АНІГЛЯЦІЇ ПОЗИТРОНІВ І ВИВЧЕННЯ
КІНЕТИКИ МІКРОМЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ**

© Кудін А.П., 2001

Вивчено еволюцію дефектів структури у кристалах червоного дифосфіду цинку при опроміненні і відпалі методом анігіляції позитронів і ідентування.

Researched evolution defects of structure in crystals of red zinc diphosphide by irradiation and annealing means of positron annihilation and indentation.

Метод двоквантової електронно-позитронної анігіляції дозволяє контролювати наявність окремих моновакансій, вакансійних утворень, мікропустот тощо, а також слідкувати за кінетикою їх накопичення і відпалу. Для отримання повної інформації про природу дефектів у напівпровідниках цей селективний метод доцільніше застосовувати в комбінації з іншими методиками.

Кристали дифосфіду цинку тетрагональної модифікації після опромінення високоенергетичними частинками стають високоомними. Через високу електричну компенсацію опромінених зразків застосування традиційних методів (ефекта Холла, НСГУ, фотоелектричних тощо) є проблематичним. Тому доцільно використати методику дослідження P(h)-діаграм [1]. Неперервна реєстрація кінетики вдавлювання індентора в координатах навантаження (P) від глибини занурення (h) дає змогу отримати додаткову інформацію про еволюційні процеси в структурі кристала. Як відомо [2], величина миттєвої швидкості занурення визначається через енергію активації, яка є лінійною функцією від миттєвої мікротвердості H:

$$U^*(H) = U^*_0 - \gamma^* H. \quad (1)$$

Коефіцієнт γ^* , що визначається за нахилом до осі абсцис лінійної залежності $U^*(H)$, характеризує величину активаційного об'єму, який згідно з теорією термофлуктаційного руйнування пропорційний зміні параметру решітки. За допомогою активаційного об'єму зручно вивчати релаксаційні процеси кристалічної решітки при різних деструкційних діях (опромінення, відпал, нагрівання тощо).

Кристали дифосфіду цинку опромінювались електронами з енергією $E = 14$ МеВ до доз $\Phi = 10^{18}$ см⁻² при 300 К. Ізохронний відпал тривав 15 хв і проводився у вакуумованих ампулах.

Кутовий розподіл анігіляційних фотонів (КРАФ) досліджувався на установці з лінійно-точковою геометрією при кімнатній температурі. Джерелом позитронів був ізотоп ²²Na з активністю 10 мкКюрі. Криві кутового розподілу анігіляційних квантів для неопроміненого, опроміненого і відпаленого при температурах, які відповідають кінцям основних температурних стадій відпалу електропровідності (рис. 1, крива 1) в інтервалі 0-7 мрад апроксимуються параболічною залежністю. При $\varphi > 7$ мрад переважає гауссівський розподіл. Стандартне відхилення гауссівської кривої, пов'язане з відстанню r_m від центра іона, де добуток хвильових функцій позитрона і електрона максимальний, визначається за формулою :

$$1/(2\sigma_2) = 1/3 (me/h)^2 r_m^2, \quad (2)$$

m – маса електрона, e – заряд електрона, h – постійна Планка.

У роботі [3] показано, що параметр r_m мало відрізняється від величини ковалентного радіуса атома, який бере участь в анігіляції. Це дає можливість при аналізі експериментальних даних робити висновки про природу центрів анігіляції.

На рис. 1 і 2 показані криві відновлення параметрів анігіляції позитронів і мікромеханічних досліджень. Внаслідок опромінення звужуються криві та зростає інтенсивність рахунку в максимумі кривої КРАФ- I_0 (рис. 1, крива 2). За допомогою кривих КРАФ побудовано імпульсний розподіл електронно-позитронних пар. На рис. 2 показано зміщення максимуму імпульсного розподілу $\Delta\varphi$, а також параметрів r_m і γ^* під час ізохронного відпалу.

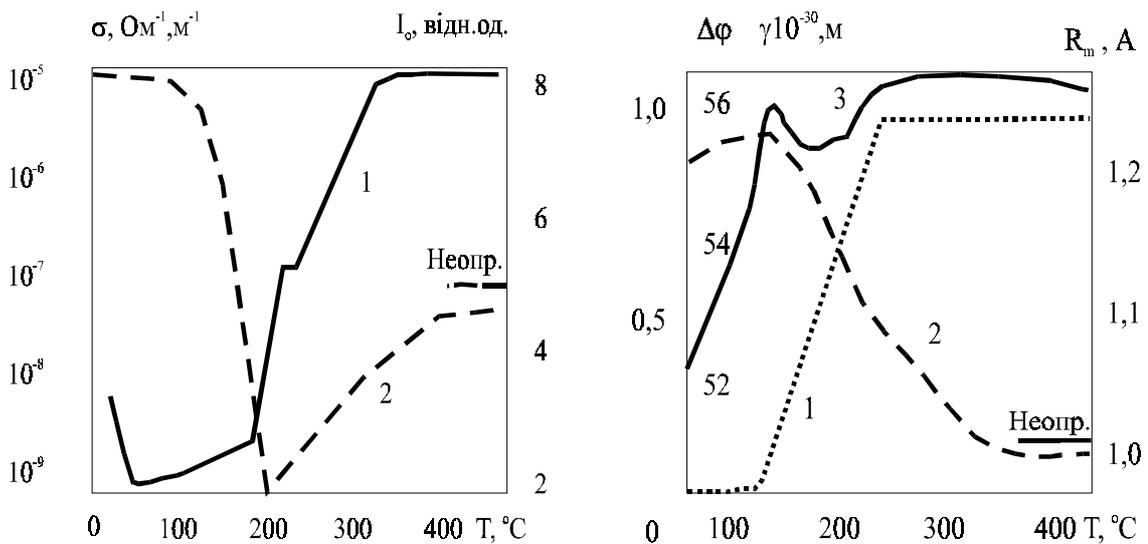


Рис. 1. Ізохронний відпал електропровідності σ (1) і I_0 у кристалі αZnP_2

Рис. 2. Залежність $\Delta\varphi$ (1), r_m (2) і $I_0 \gamma^*$ (3) від температури відпалу

Із рис. 1 і 2 видно, що високоенергетичні електрони вводять в дифосфід цинку дефекти вакансійного типу, але зміщення максимуму імпульсного розподілу при цьому не спостерігається. Як показано у роботі [4], при $T > 300$ К ізольованих міжвузільних атомів і моновакансій в дифосфіді цинку не існує. Тоді можна стверджувати, що утворені опроміненням дефекти мають лінійні розміри більші, ніж вихідні недосконалості структури. Підтвердженням цього може бути збільшення параметра r_m , коли положення максимуму імпульсного розподілу в опроміненних кристалах порівняне з неопроміненними не змінюється. Зменшення активаційного об'єму γ^* при цьому можна пояснити тим, що при опроміненні, крім вакансійних дефектів, можуть утворюватись порушення не позитрон-чутливі (антиструктурні дефекти тощо). Зміна ж величини r_m в той чи інший бік свідчить про те, який канал анігіляції (атом більшого чи меншого радіуса) домінує. У зв'язку з тим, що іонні радіуси атомів цинку і фосфору суттєво відрізняються (для Zn-R = 1,31 Å, для P-R = 1,00 Å), близькість значень параметра r_m (рис. 2) до величини радіуса фосфору у неопроміненних кристалах вказує на участь в актах анігіляції “термалізований позитрон – атомний електрон” переважно атомів фосфору. В опроміненому зразку – на участь атомів цинку (параметр $r_m = 1,2$ Å). У температурному інтервалі 27 – 77 °С спостерігається деяке збільшення параметра r_m (рис. 2), але при цьому концентрація дефектів вакансійної природи не зростає ($I_0 = \text{const}$) (рис. 1). Очевидно, що це вказує на участь в анігіляційних актах атомів цинку. Джерелом таких центрів можуть бути антиструктурні дефекти типу – Zn_p, що можуть розпадатися в цьому температурному інтервалі. Існування атомів фосфору у міжвузільній малоймовірно через великий іонний радіус фосфору порівняно з довжиною зв'язку Zn-P і P-P. Розрахунки, виконані комп'ютерним моделюванням, показали, що в області аніонної вакансії (V_{Zn}) середній імпульс зв'язаного електрона менший, ніж в області дефектів катіонної вакансії. Тому зменшення інтенсивності у максимумі КРАФ і одночасне зміщення максимуму імпульсного розподілу в бік більших кутів у температурному інтервалі 100 – 150 °С можна пояснити розпадом введених опроміненням вакансійних комплексів на основі вакансії цинку і зменшенням їх концентрації. Як видно із рис. 2, ці скупчення слабо впливають на релаксаційні процеси в решітці кристала, але за природою це не антиструктурні дефекти. Відпал до 200 °С приводить до зменшення величини I_0 нижче значень її у вихідному кристалі, тобто концентрація вакансійних дефектів стає нижчою, ніж була у неопроміненому зразку. Відсутність змін відповідних параметрів при відпалі неопроміненого кристала до $T = 770$ К свідчить про гетеруючий вплив дефектів радіаційної природи. Тобто при нагріванні до 200 °С під час розпаду вакансійних комплексів спостерігається анігіляція вакансій цинку з вихідними технологічними домішками. Збільшення значення I_0 при температурах, вищих за 200 °С вказує на ріст кількості центрів, що ефективно зв'язують позитрони. Можливо, що ці центри близькі за природою до термодфектів, які генеруються в дифосфіді цинку термічно в цьому ж інтервалі [4]. Відпал до 400 °С не відновлює положення максимуму і форму кривої імпульсного розподілу. При цьому в решітці кристала відбувається відштовхування сусідніх атомів, що приводить до збільшення її активаційного об'єму. Такі зміни можуть викликати складні вакансійні кластери, що утворюються в результаті дифузії вакансій при високих температурах.

1. Doerner M.F., Nix W.A. *Method for interpreting the Data From Deth-Sensing Instrument.* // *J. Mater. Res.*, 1986. Vol. 1. P. 601-609. 2. Li D., Chung Y.W., Wong M., Sproul W.D. *Nano-Indentation Studies of Ultrahigh Strength Carbon Mitriede Thih Films.* // *J. Appl. Phys.* 1993. Vol. 74. P. 219-223. 3. Hasiguti R. *Positron annihilation.* I.N.Y: Per. Press. 1979. 4. Januskevicius Z., Koval V., Kudin A. *Radiation defects of Zinc Diphosphide* // *Phys. Stat. Sol. (a)* 1984. Vol. 81. K. 191-194.