

Вплив ультразвуку на відпал радіаційних дефектів у нейтронно-легованому кремнії

*Роботу виконано на кафедрі загальної фізики
фізичного факультету КНУ ім. Т. Шевченка*

Шляхом вимірювання часу життя носіїв заряду досліджено вплив термічної та ультразвукової обробки на концентрацію точкових радіаційних дефектів в γ -опромінену нейтронно-леговану кремнію. Виявлено, що ультразвук суттєво змінює характер відпалу радіаційних дефектів в інтервалі температур 160–240 °С. Цей ефект пояснюється стимульованими ультразвуком процесами перебудови точкових дефектів в околі домішково-дефектних скупчень.

Ключові слова: нейтронно-легований кремній, радіаційні дефекти, ультразвук, час життя носіїв заряду.

Подолян А. О. Влияние ультразвука на отжиг радиационных дефектов в нейтронно-легированном кремнии. Путем измерения времени жизни носителей заряда исследовано влияние термической и ультразвуковой обработок на концентрацию точечных радиационных дефектов в γ -облученном нейтронно-легированном кремнии. Установлено, что ультразвук существенно изменяет характер отжига радиационных дефектов в интервале температур – 240 °С. Этот эффект объясняется стимулированными ультразвуком процессами перестройки точечных дефектов в окрестности примесно-дефектных скоплений.

Ключевые слова: нейтронно-легированный кремний, радиационные дефекты, ультразвук, время жизни носителей заряда.

Podolyan A. O. PodoInfluence an Ultrasound on Annealing of Radiation Defects in to Neutron-Alloyed Silicon. The effects of heat and ultrasound treatment on the concentration of point defects in γ -irradiated neutron-transmutation-doped silicon were studied by measuring minority carrier lifetimes. It was found that the ultrasound substantially changes the annealing behavior of point defects at temperatures 160–240 °С. This can be explained by the ultrasonically stimulated rearrangements of point defects in the vicinity of defect-impurity clusters.

Key words: neutron-transmutation-doped silicon, radiation defects, ultrasound, minority carrier lifetime.

Постановка наукової проблеми та її значення. Завдяки дуже малим флуктуаціям у розподілі легуючої домішки фосфору (середнє значення радіальної однорідності питомого опору в зливку ~2 %), нейтронно-легований кремній (НЛК) є основним матеріалом для виготовлення таких детекторів випромінювань, як лавинні фотодіоди [9] і дрейфові детектори [5], які використовуються в спектроскопії фотонів, рентгенівського та γ -випромінювання, високоенергетичних заряджених частинок. Однак в умовах підвищеної радіації робочі характеристики детекторів деградує за рахунок накопичення радіаційних електрично-активних дефектів (РД) [3]. Для зменшення концентрації РД проводять спеціальні термічні відпали. Однак загальновідомо, що в результаті таких обробок у кремнії можуть утворюватися інші типи електрично-активних дефектів. Як альтернативний інструмент впливу на концентрацію дефектів у напівпровідниках можна розглядати ультразвук (УЗ). Зокрема, була продемонстрована можливість використання УЗ для відпалу точкових РД у кремнії [3]. Головна перевага цього методу полягає в тому, що ультразвукова обробка кремнію проводиться при температурах, близьких до кімнатних. З іншого боку, була продемонстрована стимулювальна роль УЗ при ізохронному термічному відпалі РД у нейтронно-легованому германії [2].

Мета нашої роботи – дослідити вплив УЗ на відпал точкових електрично-активних РД, створених в НЛК γ -квантами ^{60}Co .

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження. Досліджувані зразки розмірами 12×6×6 мм вирізали із середньої частини зливка НЛК із $\rho=220$ Ом·см. Грані зразків шліфували механічно і протравлювали в CP4 . Опромінення γ -квантами (інтегральний потік $9,3 \cdot 10^{15}$ кв/см²) проводили при температурах <40 °С. Час життя нерівноважних носіїв заряду τ , як найбільш чутливий до наявності точкових електрично-активних РД параметр, знаходили з кінетики загасання фотопровідності [8]. Для проведення ультразвукового навантаження (поздовжні хвилі частотою 3-5 МГц з інтенсивністю до 1,5 Вт/см²) використовували перетворювач із LiNbO_3 , який

приклеювали на грань зразка за допомогою спеціального термостійкого клею. Це давало змогу проводити ультразвукові навантаження при нагріванні зразка до 250 °С. Усі обробки проводили на повітрі.

Опромінення γ -квантами ^{60}Co створює в об'ємі кристала точкові електрично-активні РД, параметри яких добре відомі [4]. За рахунок цих РД повинна суттєво зменшуватися величина τ . На рис. № 1 наведено криві загасання фотопровідності в одному з досліджуваних зразків НЛК до опромінення (крива 1) та зразка після опромінення (крива 2).

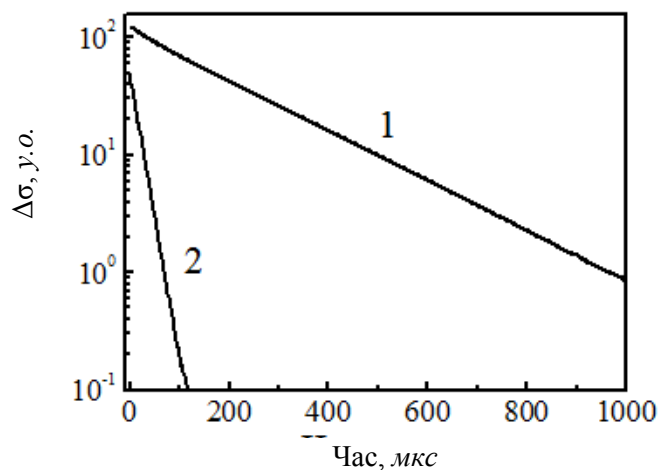


Рис. 1. Криві загасання фотопровідності в зразку НЛК до опромінення (1) та після опромінення γ -квантами ^{60}Co (2)

Пришвидшення кінетики загасання фотопровідності в опроміненому зразку свідчить про зменшення τ за рахунок утворених РД. При зменшенні концентрації рекомбінаційно-активних РД, навпаки, буде спостерігатися зростання τ . Так, контроль τ на різних етапах обробки опромінених зразків НЛК дає можливість опосередковано контролювати концентрацію рекомбінаційно-активних РД. Відносну частку невідпалених рекомбінаційно-активних РД зручно виражати функцією $f = (\tau_b^{-1} - \tau_{b0}^{-1}) \cdot (\tau_{b\Phi}^{-1} - \tau_{b0}^{-1})^{-1}$, де τ_{b0} , $\tau_{b\Phi}$ та τ_b – часи життя нерівноважних носіїв заряду до опромінення, після опромінення та після чергового етапу обробки опроміненого зразка, відповідно.

На рис. 2 представлено експериментальні результати у вигляді часової залежності частки невідпалених рекомбінаційно-активних РД f в опромінених зразках НЛК для двох різних обробок.

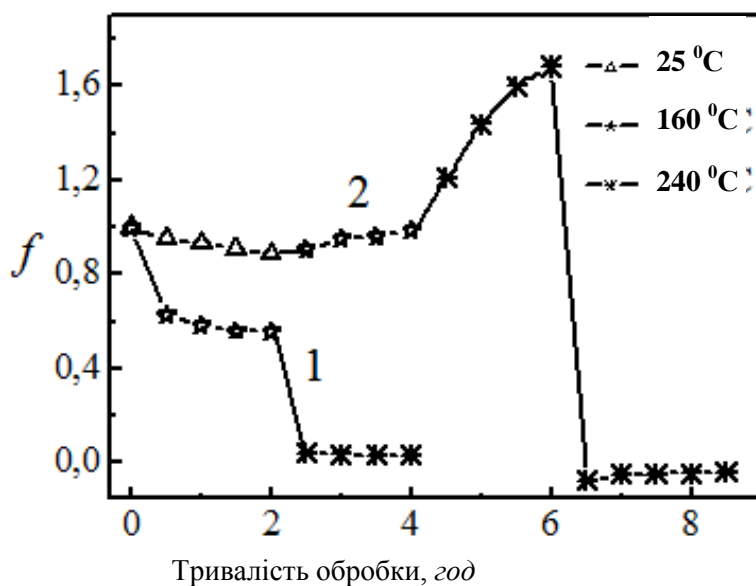


Рис. 2. Часові залежності частки невідпалених рекомбінаційно-активних РД в опроміненіх зразках НЛК при термічній обробці (1) та при термічній обробці в присутності УЗ навантаження (2). На вкладці вказані температури, при яких відбувалася обробка зразків

У першому випадку зразок піддавали лише термічній обробці (рис. 2, крива 1). У другому випадку термічну обробку опроміненого зразка доповнювали УЗ навантаженням (рис. 2, крива 2). При цьому слідкували, щоб температури зразків під час обробок в обох випадках співпадали. Проаналізуємо отримані результати. При термічній обробці опроміненого зразка за температури 160 °C величина f різко зменшується протягом перших 30 хв і, слабо змінюючись, прямує до значення $\sim 0,56$ протягом наступних 1,5 год (рис. 2, крива 1). Під час наступної термічної обробки за температури 240 °C величина f швидко прямує до нуля протягом перших 30 хв і майже не змінюється протягом наступних 1,5 год. Ці результати свідчать про те, що термічний відпал радіаційних дефектів відбувається у дві стадії. На першій стадії (температура 160 °C) відпалюється $\sim 44\%$ рекомбінаційно-активних РД, а на другій стадії (температура 240 °C) відпалюється решта $\sim 56\%$ рекомбінаційно-активних РД.

Характер відпалу рекомбінаційно-активних РД суттєво відрізняється для випадку, коли термічна обробка опроміненого зразка супроводжується УЗ навантаженням (рис. 2, крива 2). Насамперед слід звернути увагу на те, що УЗ навантаження за кімнатної температури призводить до зовсім незначного зменшення f , якому відповідає зменшення концентрації рекомбінаційно-активних РД на $\sim 10\%$. УЗ навантаження за температури 160 °C викликає зворотний ефект – f майже повертається до початкового значення, що в такому випадку свідчить про зростання концентрації рекомбінаційно-активних дефектів на $\sim 10\%$. Найбільш помітний ефект УЗ навантаження спостерігався за збільшення температури обробки до 240 °C. Протягом перших двох годин УЗ навантаження за такої температури спостерігається монотонне зростання f до $\sim 1,7$ (рис. 2, крива 2), що можна пояснити доутворенням рекомбінаційно-активних дефектів. Однак уже протягом наступних 30 хв УЗ навантаження за такої температури величина f різко зменшується до $\sim 0,07$. Таку поведінку f можна пояснити зменшенням концентрації рекомбінаційно-активних дефектів до значення, яке навіть менше за концентрацію рекомбінаційно-активних дефектів у неопроміненому зразку. Нарешті, наступні 2 год УЗ навантаження при 240 °C уже не викликають суттєвих змін величини f .

Для пояснення отриманих результатів потрібно розглянути особливості методу нейтронного легування. Заключним етапом процедури нейтронного легування кремнію є термічна обробка за температур ~ 800 °C, у результаті якої відпалюються дефекти, утворені під час опромінення тепловими і швидкими нейтронами. Після такої обробки концентрація носіїв заряду визначається концентрацією трансмутованих атомів фосфору, а також відновлюються значення рухливості носіїв заряду. Однак досліді з НЛК показують, що величина τ не відновлюється навіть після відпалів при

1000 °C [6], спостерігаються особливості в накопиченні та відпалі точкових РД в опроміненому НЛК [1], а також поява надлишкових порівняно з атомами трансмутованого фосфору вільних носіїв заряду після відпалів вище ~900 °C [7]. Усі ці результати свідчать про те, що в об'ємі НЛК навіть після відновлювального відпалу при ~800 °C залишаються дефекти структури. Висувається припущення, що вони представляють собою домішково-дефектні скупчення (ДДС) міжвузельного типу, які створюють навколо себе деформаційні поля [1]. Як було показано в роботі [1], наявність ДДС зумовлює особливості накопичення та відпалу точкових РД у НЛК. Отже, отримані в цій роботі результати також слід пояснювати з урахуванням існування ДДС в об'ємі НЛК. Насамперед слід відзначити, що в досліджуваному НЛК при опроміненні γ -квантами ^{60}Co утворюються два основні типи рекомбінаційно-активних РД, які відпалюються за різних температур (рис. № 2, крива 1). Спираючись на велику сукупність експериментальних даних, можна вважати, що це саме E -центри ($E_c=0,40\pm 0,46$ eВ) та дивакансії VV ($E_c=0,41$ eВ) [4]. Температура першої стадії термічного відпалу РД у досліджуваних зразках (160 °C) співпадає з температурою відпалу E -центрів, проте як температура другої стадії термічного відпалу (240 °C) буде дещо меншою за температуру відпалу дивакансій VV (~300 °C) [4]. Можна припустити, що таке зменшення температури відпалу дивакансій VV у досліджуваному НЛК пов'язане із впливом деформаційних полів ДДС, в околі яких переважно утворюються дивакансії. УЗ навантаження опроміненого НЛК за кімнатних температур слабо змінює концентрацію саме E -центрів. Проте УЗ навантаження за температури 160 °C, при якій повинен відбуватися відпал E -центрів, призводить навіть до незначного зростання концентрації рекомбінаційно-активних дефектів. Це можна пояснити тим, що УЗ стимулює міграцію рухливих за даної температури E -центрів до ДДС, в околі яких відбувається доутворення дивакансій VV та інших рекомбінаційно-активних дефектів за рахунок розвалу E -центрів. Нарешті, під час збільшення температури УЗ навантаження до 240 °C в околі ДДС починають відбуватися складні процеси перебудови дефектів, у результаті яких протягом перших 2 год відбувається доутворення рекомбінаційно-активних дефектів, а потім різке зменшення їх концентрації.

Висновок. Отже, у роботі експериментально встановлено, що в інтервалі температур 160–240 °C УЗ стимулює процеси міграції та перебудови точкових радіаційних дефектів в опроміненому НЛК. Висунуто припущення, що дані процеси відбуваються за участі ДДС, утворюваних в об'ємі НЛК під час нейтронного легування та наступного відпалу. Однак для деталізації стимульованих УЗ процесів потрібно проводити подальші дослідження із залученням інших методик, які дають змогу більш точно визначати концентрацію та тип дефектів.

Список використаних джерел та літератури

1. Колковский И. И. Особенности отжига рекомбинационных центров в нейтронно легированном кремнии / Колковский И. И., Шуша В. В. // ФТП. – 1987. – Т.21, №11. – С. 1974–1977.
2. Олих Я. М. О влиянии ультразвука на отжиг радиационных дефектов в нейтронно-легированном германии / Я. М. Олих, Н. И. Карась // ФТП. – 1996. – Т. 30, № 8. – С. 1455–1459.
3. Подолян А. А. Влияние ультразвука на отжиг радиационных дефектов в кремнии при комнатных температурах / Подолян А. А., Хиврич В. И. // Письма в ЖТФ. – 2005. – Т. 31, №10. – С. 11–16.
4. Bruzzi M. Radiation Damage in Silicon Detectors for High-Energy Physics Experiments / Bruzzi M. // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 2001. – V. 48, № 4. – P. 960–971.
5. Gatti E. Review of semiconductor drift detectors / Gatti E., Rehak P. // Nucl. Instr. and Meth. A. – 2005. – V. 541, № 1–2. – P. 47–60.
6. Maekawa T. Carrier lifetime of silicon wafers doped by neutron transmutation / Maekawa T., Inoue S., Aiura A., Usami A. // Semicond. Sci. Technol. – 1986. – V. 1, № 5. – P. 305–312.
7. Maekawa T. Annealing behaviour of excess carriers in neutron-transmutation-doped silicon / Maekawa T., Nogami S., Inoue S. // Semicond. Sci. Technol. – 1993. – V. 8, № 3. – P. 459–467.
8. Saritas M. Comparison of minority-carrier diffusion length measurements in silicon by the photoconductive decay and surface photovoltage methods / M. Saritas, H. D. McKell // J. Appl. Phys. – 1988. – V. 63, № 9. – P. 4561–4567.
9. Renker D. Advances in solid state photon detectors / Renker D., Lorenz E. // JINST. – 2009. – V. 4. – P. 4004.

Стаття надійшла до редколегії
26.12. 2012 р.