

## Вплив дефектів на радіаційну стійкість p-Si

*О. П. Долголенко, М. Д. Варенцов, Г. П. Гайдар, П. Г. Литовченко*

Інститут ядерних досліджень НАН України

Досліджено високоомні зразки p-Si ( $p_0 = (3,3 \pm 0,5) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ) і n-Si ( $n_0 = (2,0 \pm 0,3) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ), вирощені методом зонної плавки та опромінені різними флюенсами швидких нейтронів реактора. Опромінення проводилося при кімнатній температурі на горизонтальному каналі реактора ВВР-М з інтенсивністю потоку нейтронів  $5 \cdot 10^8 \text{ н}^0 \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  в інтервалі флюенсів  $(10^{11} \div 2 \cdot 10^{14}) \text{ н}^0 \cdot \text{см}^{-2}$ . Вимірювання провідності та постійної Холла виконано з точністю 3 % компенсаційним методом Ван дер Пау на квадратних зразках розміром  $10 \times 10 \times 1 \text{ мм}$ . Контакти створювалися втиранням алюмінію на шліфовану поверхню кремнію. Розрахунок ефективної концентрації носіїв у залежності від дози опромінення проводився в рамках уточненої моделі Госсіка.

Показано, що радіаційна стійкість p-Si є більшою, ніж n-Si. Якщо в n-типі вона визначається  $n \rightarrow p$  конверсією провідної матриці, то в p-типі радіаційна стійкість пов'язана з дозою, при якій відбувається повне перекриття кластерів дефектів. З'ясовано, що після дози опромінення  $\sim 5 \cdot 10^{13} \text{ н}^0 \cdot \text{см}^{-2}$  концентрація носіїв у p-Si виходить на постійне значення  $8 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$  і, отже, рівень Фермі займає в забороненій зоні p-Si положення  $E_V + 0,476 \text{ еВ}$ , яке майже не залежить від рівня легування.

Концентрацію носіїв в n-Si у залежності від дози опромінення описано з використанням ефективності введення  $\nu = 0,25 \text{ см}^{-1}$  акцепторного рівня ( $E_C - 0,49 \text{ еВ}$ ) та радіуса кластера  $R_1 = 40 \text{ \AA}$ . Положення рівня Фермі в кластері було розраховано згідно з одержаною нами формулою  $F = E_C - 0,6 + 0,033 \log(n_0/n_{\text{intr}})$ , ( $n_{\text{intr}} = 10^{10} \text{ см}^{-3}$ ) і становить  $F = E_C - 0,524 \text{ еВ}$ . Для опису дозової залежності концентрації носіїв у p-Si використано ефективність введення донорного рівня ( $E_V + 0,51 \text{ еВ}$ )  $\nu = 0,06 \text{ см}^{-1}$  та акцепторного рівня ( $E_V + 0,42 \text{ еВ}$ )  $\nu = 0,1 \text{ см}^{-1}$ , а також радіус кластера  $R_1 = 36 \text{ \AA}$ .

Визначено, що після витримки при кімнатній температурі протягом 3-х місяців у зразках n- і p-Si середній радіус кластерів зменшився приблизно у два рази.

Показано, що для опису температурної залежності ефективної концентрації носіїв у p-Si необхідно також враховувати введення як донорних дефектів ( $E_V + 0,45 \text{ еВ}$  і  $E_V + 0,51 \text{ еВ}$ ), так і акцепторного ( $E_V + 0,42 \text{ еВ}$ ) дефекту. Раніше було встановлено, що акцепторний рівень ( $E_V + 0,42 \text{ еВ}$ ) належить міжвузловому атому кремнію ( $I_1$ ), а донорний рівень ( $E_V + 0,45 \text{ еВ}$ ) – диміжвузлю ( $I_2$ ). Ми припускаємо, що донорний рівень ( $E_V + 0,51 \text{ еВ}$ ) належить диміжвузлю, модифікованому киснем ( $I_2O_1$ ).

Показано, що різка зміна швидкості введення вищезгаданих радіаційних дефектів у p-Si при малих дозах опромінення пов'язана з їх відпадом у процесі опромінення. Радіаційний відпал цих дефектів, на нашу думку, обумовлений зміною їх зарядового стану, що призводить до зменшення енергії активації відпалу. Енергія відпалу міжвузлового атома в негативному зарядовому стані ( $\Gamma$ ) дорівнює  $0,85 \text{ еВ}$ , диміжвузля в позитивному зарядовому стані ( $I_2^+$ ) –  $0,6 \text{ еВ}$ . Під опроміненням енергія відпалу цих дефектів зменшується відповідно до  $0,4 \text{ еВ}$  і  $0,42 \text{ еВ}$ . Енергія активації відпалу рівня ( $E_V + 0,51 \text{ еВ}$ ) у процесі опромінення становить  $0,42 \text{ еВ}$ .

Таким чином, радіаційна стійкість n- і p-кремнію визначається, з одного боку, кластерами, а з іншого – вакансійного типу дефектами (акцепторами) в n-Si та міжвузлового типу дефектами (донорами й акцепторами) в p-Si.