

## ВПЛИВ УЛЬТРАЗВУКУ НА ЕЛЕКТРИЧНУ АКТИВНІСТЬ РАДІАЦІЙНИХ ДЕФЕКТІВ У $\gamma$ -ОПРОМІНЕНИХ КРИСТАЛАХ КРЕМНІЮ $n$ -ТИПУ

В. М. Бабич<sup>1</sup>, О. П. Долголенко<sup>2</sup>, Я. М. Оліх<sup>1</sup>, М. Д. Тимочко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України, Київ

<sup>2</sup> Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

Досліджено вплив ультразвукової (УЗ) обробки ( $f = 5 \div 15$  МГц,  $W \leq 2$  Вт/см<sup>2</sup>,  $t \approx 10^4$  с) на перебудову радіаційних дефектів (РД) у кристалах  $n$ -Si з високою концентрацією кисню ( $9,5 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>), опромінені  $\gamma$ -квантами <sup>60</sup>Со дозами  $10^8$  і  $10^9$  рад. Виявлено зміни температурних (100 - 300 К) залежностей концентрації  $n(T)$  та рухливості носіїв заряду  $\mu(T)$  після проведених  $\gamma$ -опромінь (незворотні зміни) та УЗ обробок (зворотні). Із теоретичних розрахунків  $n(T)$  визначено енергетичні положення дефектних рівнів  $E_a^i$  та їх концентрації  $N_a^i$ . Обговорюється можливість акустостимульованої перебудови виявлених РД (дивакансії  $V_2^-$ ,  $E_a^1 = (E_c - 0,424$  еВ), модифікованого  $A$ -центра ( $V - O$ ),  $E_a^2 = (E_c - 0,205$  еВ) і комплексу, що може містити азот (? + N),  $E_a^3 = (E_c - 0,19$  еВ)) шляхом зміни конфігурації, структури та зарядженості на прикладі дворівневої енергетичної конфігураційно-координатної моделі.

### Вступ

Відомо, що ультразвукові (УЗ) хвилі активно взаємодіють із системою дефектів кристала і можуть бути використані для досліджень властивостей дефектів структури. Поширення УЗ хвилі в кристалі може приводити до модуляції рівноважної концентрації точкових дефектів і їх комплексів, а також до перерозподілу і/або переорієнтації дефектів у просторі [1]. Для того щоб створити електрично- та оптично-активні центри, які були б і акустично-чутливими, використовують дію жорсткого випромінювання ( $\gamma$ -променів, електронів високих енергій, нейтронів тощо) [2]. У результаті опромінення виникає цілий спектр радіаційних дефектів (РД), який в основному визначається комплексами вторинних дефектів (дивакансії,  $A$ - та  $E$ -центри, інші метастабільні комплекси) [3]. Інтерес до таких дефектів обумовлений, з практичної точки зору, можливістю використання явища метастабільності та бістабільності для створення елементів пам'яті нового покоління [4], зокрема можливістю керування станом дефектів, а значить, і властивостями матеріалу та характеристиками приладів за допомогою ультразвуку [2].

Отже, метою даної роботи було виявлення та дослідження процесів перебудови РД під дією УЗ обробки в кристалах кремнію  $n$ -типу, а також з'ясування механізму даної взаємодії.

### Експеримент

Досліджувались зразки бездислокаційного кристала кремнію  $n$ -типу, виготовлені за методом Чохральського  $n$ -Si-Cz:P ( $n = (2,5 \pm 0,5) \times 10^{14}$  см<sup>-3</sup>) з питомим опором  $\rho = 35$  Ом·см та фоновими домішками  $N_O = 9,5 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>,  $N_C = 3,0 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>).

Для створення в кристалах  $n$ -Si "акустоактивних" дефектів, електричною активністю яких можна було б керувати УЗ обробкою, зразки при кімнатній температурі опромінювались  $\gamma$ -квантами <sup>60</sup>Со дозами:  $D_1 \sim 10^8$  рад  $\approx 1,93 \cdot 10^{17}$   $\gamma$ /см<sup>2</sup> і  $D_2 \sim 10^9$  рад  $\approx 1,93 \cdot 10^{18}$   $\gamma$ /см<sup>2</sup>. Було проведено дослідження зразків до і після опромінення, а також після УЗ обробки (повздовжні хвилі, частота  $5 \div 15$  МГц, інтенсивність  $\leq 2$  Вт/см<sup>2</sup>, тривалість обробки  $\sim 10^4$  с, температура нагріву  $< 70$  °С) одразу після обробки та через три доби. Вимірювання концентрації та рухливості проводились методом ефекту Холла в температурному діапазоні  $100 \div 300$  К на стандартних прямокутних зразках у режимі постійного струму і постійного магнітного поля  $0,45$  Тл із точністю 3 %. Омичні контакти створювались втиранням евтектичної суміші золота і кремнію при  $450$  °С [5].

### Температурні залежності концентрації та рухливості $n$ -Si

У вихідних зразках концентрація електронів, що визначалась за формулою  $n = r_H / e \cdot R_H$ , у досліджуваному температурному інтервалі відповідає повній іонізації мілких донорів (атомів фосфору):  $n = 2,54 \cdot 10^{14}$  см<sup>-3</sup> (рис. 1, а, крива 1).

Після опромінення  $\gamma$ -квантами <sup>60</sup>Со дозами  $\sim 10^8$  рад та  $\sim 10^9$  рад на температурній залежності концентрації електронів проявляються рівні, пов'язані з утворенням РД (див. рис. 1, а, криві 2 і 4). Причому нахил залежностей для двох доз різний, що говорить про різні концентрації утворення одних і тих же дефектів [3]. Слід відзначити, що характер  $\mu(T)$  після опромінення як дозою  $10^8$ , так і дозою  $10^9$  рад має схожий вигляд (див. рис. 1, б, криві 2 і 4), а саме описується різким спадом при зниженні температури до  $100 - 135$  К, причому нахил  $\mu(T)$  значно крутіший від залеж-

ності  $\mu \sim T^{3/2}$ , яка визначається розсіюванням носіїв струму на іонізованих домішках [6].

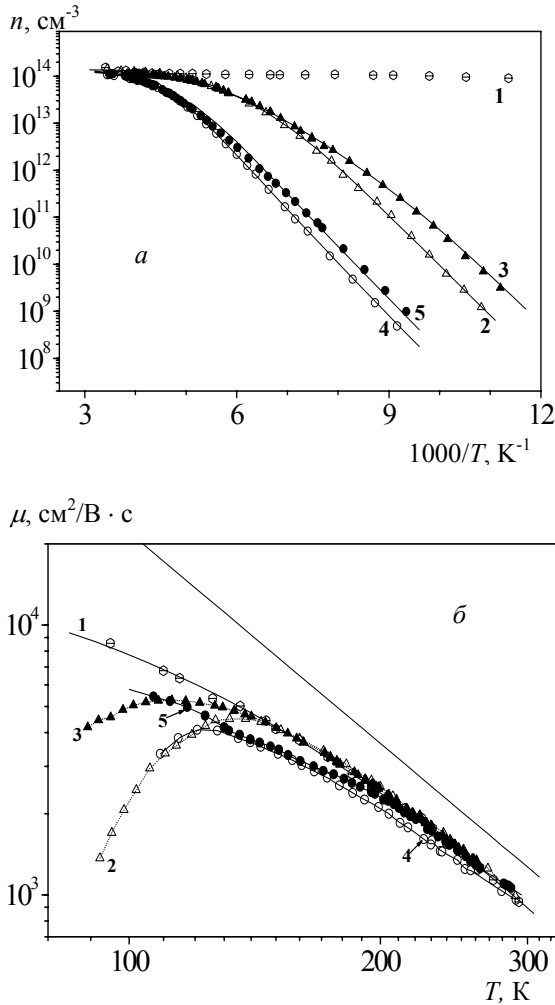


Рис. 1. Температурні залежності концентрації (а) та рухливості (б) носіїв заряду у зразку Si-Cz n-типу на різних етапах  $\gamma$ -опромінення та наступної ультразвукової обробки. 1 - вихідний зразок; 2 - після  $\gamma_1(10^8 \text{ рад})$  опромінення; 3 - після УЗО  $\gamma_1$ -опроміненого зразка; 4 - після  $\gamma_2(10^9 \text{ рад})$  опромінення; 5 - після УЗО  $\gamma_2$ -опроміненого зразка.

Внесені радіаційні порушення стійкі і залишаються стабільними протягом більше річної витримки кристала при кімнатній температурі.

Для зразків n-Si після дози  $10^8 \text{ рад}$  було проведено ультразвукову обробку (УЗО). У результаті її дії відбувається зменшення нахилу  $n(T)$ , а також збільшення величини  $\mu(T)$  та її зсув в область низьких температур (див. рис. 1, криві 3). Після другого етапу опромінення  $10^9 \text{ рад}$  (див. рис. 1, криві 5) відбуваються подібні процеси: також зменшується нахил  $n(T)$  і відбувається зростання  $\mu(T)$  після дії УЗО. Виміри, зроблені через декілька днів, показали зворотні зміни  $n(T)$  і  $\mu(T)$  - у напрямку повернення до вихідних залежностей, установлених після  $\gamma$ -опромінення. Наступні виміри, зроблені через два місяці, пока-

зали повну релаксацію дії УЗО обробки. Впливу УЗО обробки на вихідні, термовідпалені (при  $650 \text{ }^\circ\text{C}$  та  $700 \text{ }^\circ\text{C}$ ), а також на нейтронно-опромінені зразки не виявлено.

### Теоретичний аналіз температурних залежностей концентрації та рухливості

З метою визначення концентрації  $N_a^i$  і енергетичного положення рівнів  $E_a^i$  електрично активних РД у досліджуваних зразках нами проведено теоретичний аналіз  $n(T)$ , а також ідентифікацію відповідних дефектів. Вважаючи n-Si невинуводженим ( $N_d < 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ), припустимо, що  $\gamma$ -кванти  $^{60}\text{Co}$  рівномірно створюють точкові дефекти акцепторного типу з концентрацією  $N_a < N_d$ . При підвищенні температури зразка n-Si від 100 К концентрацію електронів  $n(T)$  у зоні провідності в результаті теплового збудження електронів з рівня  $E_a^i$  можна визначити, якщо врахувати сумарну концентрацію носіїв  $n_0(T)$ ,  $n_1(T)$ ,  $n_2(T)$ , які будуть постачатися в зону провідності при тепловій іонізації відповідних акцепторних рівнів (А-центрів, дивакансій та ін.):

$$n(T) = n_0(T) + n_1(T) + n_2(T) - 2N_d + N_a, \quad (1)$$

де  $n_i(T)$  – складові концентрації носіїв у зоні провідності за рахунок теплової іонізації відповідних глибоких акцепторних рівнів ( $i = 0, 1, 2$ ).

Розрахунок  $n_i(T)$  проводився за допомогою системи рівнянь [7]

$$n_i(T) = \frac{1}{2} \cdot (N_d - N_a^i - n_{11}^i) \times \left( \sqrt{1 + \frac{4 \cdot N_d \cdot n_{11}^i}{(N_d - N_a^i - n_{11}^i)^2}} + 1 \right), \quad (2)$$

де  $n_{11}^i = g \cdot N_c \cdot \exp\left(-\frac{E_a^i}{kT}\right)$ ;  $g = 2$  – фактор виродження акцепторного рівня;  $N_d$ ,  $N_a^i$  – концентрації чистих донорів і радіаційних акцепторів;  $N_c$  – густина станів у зоні провідності;  $n_{11}^i$  – концентрація електронів у зоні провідності при збігу положень рівня Фермі та акцепторного рівня.

Проведено теоретичний розрахунок  $n(T)$  – суцільні лінії на експериментальних залежностях концентрації (див. рис. 1, а, криві 2 - 5).  $N_a^i$  знаходяться шляхом співставлення розрахованих залежностей  $n(T)$  з експериментальними. При цьому задаються енергетичні положення 3 акцепторних рівнів  $E_a^i$  ( $i = 0, 1, 2$ ) і підбираються відповідні їм концентрації  $N_a^i$  за допомогою систе-

ми рівнянь (2) для кожного дефектного рівня до повного збігу розрахованої теоретичної кривої з експериментальними точками. Знайдені значення  $E_a^i$  та  $N_a^i$  наведено в табл. 1.

При обчисленні  $\mu(T)$  нами враховано два основних механізми розсіювання носіїв заряду: на акустичних фонах та іонізованих домішках за допомогою формули Брукса - Херінга [6]

$$\mu_I = \frac{3.68 \cdot 10^{20} \cdot \left(\frac{\kappa}{16}\right)^2 \cdot \frac{1}{Z^2} \left(\frac{T}{100}\right)^{3/2}}{N_I \cdot A}, \quad (3)$$

Таблиця 1. Розраховані значення глибини рівнів  $E_a^i$  та їх концентрації  $N_a^i$  для електрично активних дефектів, які визначають провідність  $\gamma$ -опромінених зразків n-Si; значення концентрацій кисню і вуглецю ( $N_O$ ,  $N_C$ ) у вихідних зразках відповідно

Зразок	Стан зразка	Номери кривих на рис. 1	$E_a^i$ , eV	$N_a^i$ , $10^{13} \text{ cm}^{-3}$	Тип дефекту
$n_0 = 2,54 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ $N_O = 9,5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ $N_C = 3,0 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$	Вихідний	1	--	--	--
	$D_1$	2	$E_c-0,405$	11,9	? + $O_i$ [6]
			$E_c-0,205$	13,2	V - O [7]
			$E_c-0,190$	0,5	? + N [8]
	$D_1 + \text{УЗО}$	3	$E_c-0,405$	14,4	? + $O_i$ [6]
			$E_c-0,205$	9,0	V - O [7]
			$E_c-0,190$	2,0	VO + N
	$D_2$	4	$E_c-0,424$	13,4	$V_2^-$ [7, 9]
			$E_c-0,261$	12,6	$V_2^-$ [7]
	$D_2 + \text{УЗО}$	5	$E_c-0,424$	13,9	$V_2^-$ [7, 9]
$E_c-0,261$			9,5	$V_2^-$ [7]	
$E_c-0,240$			2,6	$V_2^- + C$	

Рухливість при розсіюванні на коливаннях кристалічної ґратки обчислювалася за формулою  $\mu_n = 2.3 \cdot 10^9 \cdot T^{-2.6}$ . Загальну рухливість можна наближено знайти за допомогою правила Маттісена

$$\mu_{tot} = \frac{\mu_I \cdot \mu_n}{\mu_I + \mu_n}. \quad (4)$$

Розрахунки рухливості, проведені вказаним способом, були співставлені з експериментальними даними для радіаційно-опромінених та оброблених ультразвуком зразків (табл. 2). Урахування двох механізмів розсіювання дає змогу лише наближено оцінити кількість розсіюючих центрів. При низьких температурах (100 - 135 K) переважає розсіювання на іонізованих домішках, а при зростанні температури до кімнатної зростає внесок коливань кристалічної ґратки. Обчислення рухливості згідно з формулами (3) і (4) показало, що модель Брукса - Херінга розсіювання на іонізованих домішках [6] справедлива в області максимуму температурної залежності рухливості носіїв заряду, що дало змогу оцінити

$$\text{де } A = \sqrt{\frac{m}{m_0}} \left[ \log(1+b^2) - \frac{0.434 \cdot b}{1+b^2} \right],$$

$$b = \frac{1}{Z} \frac{\kappa}{16} \frac{T}{100} \left( \frac{2.35 \cdot 10^{19}}{N_I} \right)^{1/3}.$$

Тут  $\kappa$  – діелектрична проникливість, а  $Z$  – заряд на домішці.

концентрацію іонізованих домішок. За найкращим узгодженням теоретичних кривих з експериментальними даними оцінювалися значення  $N_a^i$  і  $N_d$

### Обговорення отриманих результатів

Відомо, що в результаті вирощування кристалів кремнію виникають різні ростові неоднорідності: преципітати, страти, включення сторонніх атомів, таких як кисень і вуглець (так звані фонові домішки), які можуть бути електрично-нейтральними й при гальваноманітних вимірюваннях себе не проявляють [8]. У результаті  $\gamma$ -опромінення однорідно по всьому об'єму кристала утворюються РД: дивакансії, А-центри,  $P_s$ - $C_i$ -центри та інші точкові дефекти. Безумовно, розподіл цих дефектів також координується з уже існуючими ростовими неоднорідностями в кристалі, збільшуючи тим самим локально напружені області та концентрацію РД у метастабільному стані. У цих областях дія УЗ обробки на РД теж підсилюється в результаті адитивності полів УЗ напружень та первісних ростових неоднорідностей. Отже, ефект УЗ дії полягає в зміні

електричної активності РД, створених у локально напружених областях, та наступної релаксації електрофізичних характеристик після припинення дії УЗ, що в цілому визначається комплексом перелічених вище факторів. Це узгоджується з

експериментальними залежностями  $\mu(T)$  для зразків, які пройшли як термообробку, так і різні види опромінювання (рис. 2).

Таблиця 2. Значення рухливості носіїв заряду  $\mu$  та концентрації іонізованих домішок  $N_I$  при різних обробках зразків Si-Cz

Стан зразка	Номери кривих на рис. 2	$T_{\text{макс}}$ , К	$\mu_{\text{макс}}$ , $\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	$r$	$N_I(\mu)$ , $10^{15} \text{ см}^{-3}$	$N_I(n)$ , $10^{15} \text{ см}^{-3}$
Вихідний	1	40	37790		2,2	
$D_1$	4	135	4500	2,57	20 - 30	0,51
$D_1 + \text{УЗО}$	5	113 135(макс. $\gamma_1$ )	5260 4730	1,14	12 - 15	0,508
$D_2$	-	121	4100	1,86	20 - 30	0,514
$D_2 + \text{УЗО}$	-	107 121(макс. $\gamma_2$ )	5440 4800	--	5 - 6	0,514
Відпал 650 °С 100 год	2	50	18220			
Відпал 700 °С 40 год	3	67	11920			
n-опромінення	6	225	1940			
Відпал 450 °С	7	127	4610			

Примітка.  $\mu_{\text{макс}}$  – максимальне значення рухливості при  $T_{\text{макс}}$ ;  $r$  – ступінь залежності  $\mu \sim T^r$  в області розсіювання на іонізованих домішках;  $N_I(n)$  – концентрація іонізованих домішок, отримана із залежності  $n(T)$  за формулою (2),  $N_I(\mu)$  – із залежності  $\mu(T)$  за формулою (3).

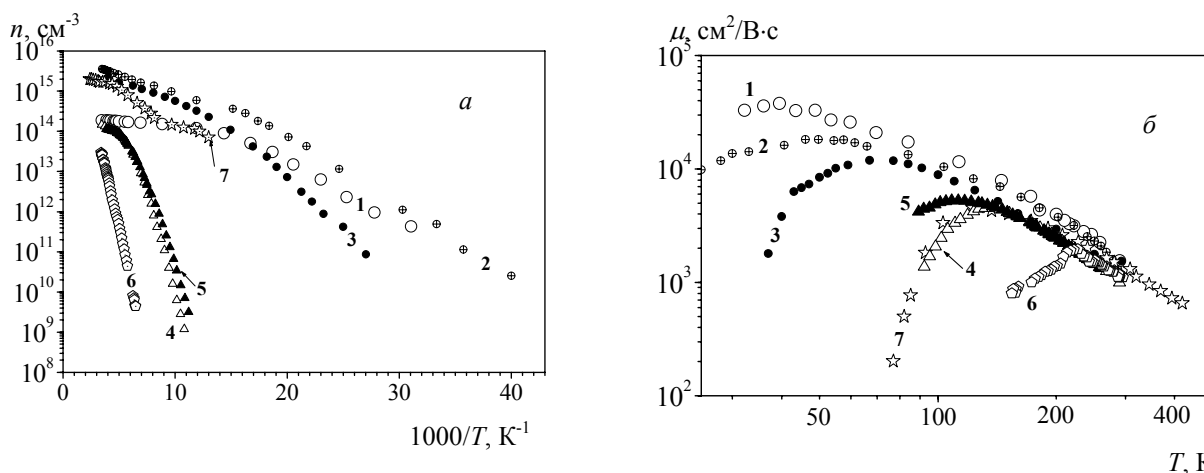


Рис. 2. Порівняння температурних залежностей концентрації (а) та рухливості (б) для зразків Si-Cz n-типу провідності після різного виду обробок. 1 - вихідний зразок; 2 - після відпалу при 650 °С, 100 год; 3 - після відпалу при 700 °С, 40 год; 4 - після  $\gamma_1(10^8 \text{ рад})$  опромінення; 5 - після УЗО  $\gamma_1$ -опроміненого зразка; 6 - після нейтронно-го ( $5 \cdot 10^{14} \text{ н/см}^2$ ) опромінення; 7 - після відпалу 450 °С, 15 год нейтронно-опроміненого p-Si.

Для встановлення природи центрів розсіювання носіїв заряду проведено співставлення (порівняння) експериментальних залежностей  $\mu(T)$  для зразків, які виготовлені на основі вихідного кристала кремнію, але містять мікродфекти різної природи. На рис. 2 наведено залежності  $\mu(T)$ , отримані для зразків n-Si-Cz:P як для вихідного матеріалу (крива 1), так і для зразків, які

пройшли тривалий (100 год) відпал при  $T = 650 \text{ °С}$  (крива 2) та при  $T = 700 \text{ °С}$  (40 год) (крива 3), тобто при наявності в зразках кисневих преципітатів різних розмірів та концентрацій. Тут же зображено відповідні залежності для зразка, опроміненого  $\gamma$ -дозою  $10^8 \text{ рад}$  та обробленого УЗ (криві 4 і 5 на рис. 2 відповідно). Для порівняння з дією  $\gamma$ -опромінення на рис. 2 (крива 6)

представлено результат дії нейтронного опромінення. Крива 7 ілюструє залежність  $\mu(T)$  для випадку сильно компенсованого матеріалу  $n$ -Si, причому вихідним матеріалом був слабо легований  $p$ -Si(B)-Cz з  $N_a = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , а компенсація за рахунок термодонорів створювалась відпалом при  $450^\circ\text{C}$  тривалістю 10 - 15 год. Після таких відпалів зразок набуває в цілому  $n$ -типу провідності  $n_e = N_{TD} - N_a \approx (2-3) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Але оскільки кисень у кристалі розподілений неоднорідно як уздовж осі злитка (спостерігаються страти з періодичністю від долей міліметра до декількох міліметрів, залежно від умов росту), так і по діаметру злитка (зменшується вміст кисню в приповерхневих шарах кристала [8]), то й утворення областей  $n$ -типу за рахунок термодонорів теж матиме негомogenous характер [9]. У такому матеріалі ще залишаються об'ємні включення  $p$ -типу провідності, яким відповідають області в об'ємі зразка з малим вмістом кисню. Масштаби цих неоднорідностей значно перевищують розміри неоднорідностей, які пов'язані з преципітатами кисню; при  $T_{відн.} \approx 650 - 700^\circ\text{C}$  розміри преципітатів сягають 4 - 5 нм [8]. Це приводить, у першу чергу, до великих значень степеня  $r$  в залежності  $\mu \sim T^r$  (крива 7 на рис. 2, б), тобто до більш значного впливу на  $\mu(T)$ , ніж ми мали при наявності в зразках преципітатів (див. криві 2, 3 та 7 на рис. 2, б відповідно). Із подальшого порівняння кривої 7 з кривою 4 видно, що в низькотемпературній області спаду  $\mu(T)$  їх значення практично збігаються. Це вказує на те, що ефективність розсіяння носіїв струму у випадку  $\gamma$ -опромінених зразків такого ж порядку (і можливо такої ж природи), як і для сильно компенсованих зразків кремнію, які мають у своєму об'ємі негомogenous-розподілені області просторового заряду  $n$ - і  $p$ -типу провідності. Оскільки  $\gamma$ -опромінення приводить, практично, до однорідного по об'єму введенню РД, то відповідальними за неоднорідний розподіл в опроміненних зразках мікродефектів із різним зарядовим станом (як вважають у [10]) можуть бути лише ростові дефекти або неоднорідності в розподілі фонових домішок, наприклад кисню чи вуглецю, які при взаємодії з первинними РД беруть участь у формуванні вторинних дефектів різної природи (акцепторів та донорів –  $A$ -центрів,  $E$ -центрів, дивакансій тощо).

Для Si-Cz зразків за допомогою теоретичних розрахунків (формули (1) і (2)) встановлено, що в результаті  $\gamma_1$ -опромінення ( $D_1 \sim 10^8$  рад) такими, що визначають  $n(T)$ , є акцепторні рівні  $E_a^1 = (E_c - 0,424 \text{ eV})$ ,  $E_a^2 = (E_c - 0,205 \text{ eV})$  і  $E_a^3 = (E_c - 0,19 \text{ eV})$ . Згідно з даними багатьох досліджень

[11, 13 - 16 та ін.] ці рівні  $E_a^1$ ,  $E_a^2$  і  $E_a^3$  можуть належати дивакансії  $V_2^-$ ,  $A$ -центру ( $V-O$ ) і невідомому комплексу, що може містити азот ( $? + N$ ) відповідно (див. табл. 1). Слід зауважити, що більшість дослідників приписують  $A$ -центру рівень  $(E_c - 0,17 \text{ eV})$  або  $(E_c - 0,18 \text{ eV})$  [3, 4, 15, 16, 18]; проте в роботі [14]  $A$ -центру ставлять у відповідність і рівень  $(E_c - 0,204 \text{ eV})$ . Ми ж схильні до думки, що рівень  $(E_c - 0,205 \text{ eV})$ , який визначаємо в досліджуваних зразках методом Холла, є теж  $A$ -центром, але дещо модифікованим полем напружень домішкових атомів [18].

Спостережені при УЗО динамічні (зворотні) зміни  $n(T)$  найімовірніше виникають у результаті певних корегованих перетворень як дефектних комплексів, так і рухомих домішкових атомів [12]. Виходячи з наших результатів (див. табл. 1), можна певним чином конкретизувати даний механізм УЗ перетворень РД в  $n$ -Si. Як відомо, міжвузельні атоми азоту  $N_i$  і вуглецю  $C_i$  характеризуються малою енергією активації й достатньо рухомі вже при кімнатних температурах, а дія УЗ хвилі буде збільшувати їх коефіцієнти дифузії в локально-напружених областях і сприяти перебудові та переорієнтації утворених дефектних центрів. Тому вважаємо, що для зразків Si-Cz комплекс  $V-O$  ( $E_c - 0,205 \text{ eV}$ ) з вихідною концентрацією після  $\gamma_1$ -опромінення  $N_{(V-O)} = 13,2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$  при УЗО модифікується атомом рухомої домішки (наприклад, азоту N) і перетворюється в комплекс  $(VO + N)$  з рівнем  $(E_c - 0,19 \text{ eV})$  [13]. Про це свідчить, зокрема, зменшення концентрації  $N_{(V-O)} = 9,0 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  і зростання  $N_{(VO+N)}$  з  $0,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  до  $2,0 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  відповідно (див. табл. 1). Після припинення УЗО відбувається поступове “звільнення” атомів азоту і “повільне” повернення всієї системи дефектів у вихідний (до УЗО) стан.

Зі збільшенням дози опромінення зразків Si-Cz до  $D_2 \sim 10^9$  рад у системі електрично-активних дефектів переважають дивакансії  $V_2^-$  ( $E_c - 0,261 \text{ eV}$ ) з концентрацією  $N_{(V_2^-)} = 12,6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . У цьому випадку більшість електронів знаходиться на більш глибокому рівні, а рівень  $A$ -центра ( $E_c - 0,204 \text{ eV}$ ) у даних холлівських вимірюваннях уже не проявляється. При УЗО, як і при відпалі дивакансій [17], найбільш рухомі атоми домішки, імовірно  $C_i$ , частково звільняються зі стоків і локалізуються поблизу  $V_2^-$ , збуджуючи при цьому їх енергетичне положення. У результаті зменшується  $N_{(V_2^-)} = 9,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  і виникає рівень  $(V_2^- + C)$  ( $E_c - 0,24 \text{ eV}$ ) з  $2,6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . Після припинення УЗО атоми  $C_i$  покидають  $V_2^-$  і відбувається відновлення рівня  $N_{(V_2^-)} = 12,6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ , система дефектів повертається у вихідний стан.

У цілому така акустостимульована поведінка досліджуваних електрично-активних дефектів узгоджується з моделлю модифікації *A*-центра домішковим атомом – модель Джеллісона (рис. 3) [18]. Дійсно, така модифікація під дією ультразвуку може відбуватися, якщо мігруючий атом домішки, наприклад вуглецю або азоту, при наближенні до дефектного центра “збурює” його енергетичне положення; унаслідок цього може відбуватися перерозподіл концентрації дефектів кристала між різними енергетичними станами та, відповідно, і зміна концентрація електронів у кристалі. Процес зворотної перебудови здійснюється шляхом відновлення термодинамічної рівноваги, але вже триваліший, оскільки відбувається без додаткової акустичної стимуляції.

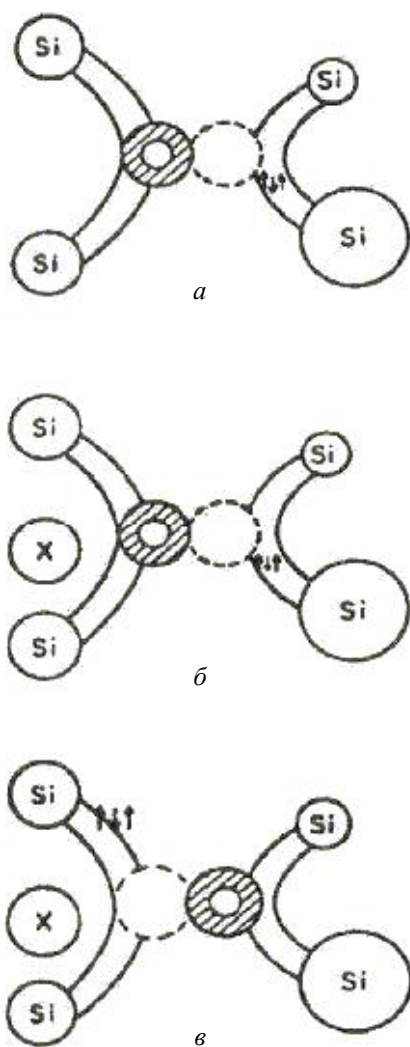


Рис. 3. Модифікація *A*-центра за Джеллісоном: *a* - *A*-центр; *б* - *A*-центр, модифікований домішкою з боку атома кисню; *в* - *A*-центр, модифікований домішкою з боку вакансії.

Отже, УЗ навантаження зразка приводить до зміни термодинамічної рівноваги системи РД, яка після вимкнення УЗ повертається до рівно-

важного положення. Для якісного представлення спостереженого явища розглянемо модель бістабільного дефекту в напівпровідниковому кристалі, електрична активність якого (положення відповідного енергетичного рівня в забороненій зоні) визначається його просторовою орієнтацією в ґратці кристала [4, 19]. На рис. 4 наведено конфігураційно-координатну модель перерозподілу концентрації дефектів між різними енергетичними станами як без ультразвуку (*a*), так і при дії ультразвуку (*б*). Відомо, що ймовірність знаходження дефекту в тому чи іншому стані визначається висотою відповідного енергетичного бар'єра (див. рис. 4, *a*). При введенні в зразок інтенсивного ультразвуку відбувається збурення вихідного розподілу і, в результаті цього, зміщення енергетичних рівнів та відповідний перерозподіл концентрації носіїв на цих рівнях (див. рис. 4, *б*). Дійсно, концентрація дефектів у станах *A* і *B* до дії УЗ визначається системою рівнянь:

$$N_A = N_0 e^{-E_1 / kT}; \quad (5)$$

$$N_B = N_0 e^{-E_2 / kT}; \quad (6)$$

$$N_0 = N_A + N_B. \quad (7)$$

А при УЗ дії:

$$N'_A = N_0 e^{-E'_1 / kT}; \quad (5')$$

$$N'_B = N_0 e^{-E'_2 / kT}; \quad (6')$$

$$N_0 = N'_A + N'_B. \quad (7')$$

Тут  $N_0$  – загальна концентрація даного типу дефектів;  $N_A$  і  $N_B$  – їх концентрації в стані *A* і *B* до дії УЗ;  $N'_A$  і  $N'_B$  – у процесі дії УЗ відповідно.

Отже, користуючись традиційними уявленнями про модифікацію в результаті домішково-вакансійної взаємодії, наприклад *A*-центра [2, 18], отримані акустостимульовані зміни згідно з такою моделлю можна представити наступним чином. У результаті дії ультразвуку відповідна конфігураційна перебудова дефекту (див. рис. 4, *a* і *б*) супроводжується зміною переважаючої емісії електронів з рівня  $E_1$ -конфігурації на емісію з рівня  $E_2$ . При цьому неспарений електрон заповненого дефекту під збурюючим впливом домішкового атома (вуглецю або азоту), який під дією УЗ наближається до *A*-центра чи дивакансії, з'єднується мостом з двома іншими атомами кремнію і відбувається зміна енергетичного спектра системи в цілому.

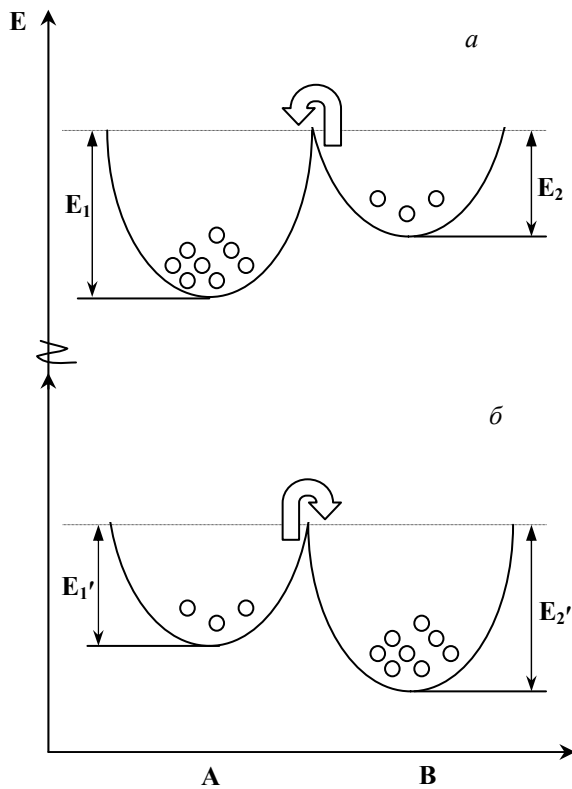


Рис. 4. Конфігураційно-координатна модель перерозподілу концентрації дефектів між різними енергетичними станами: *a* - без ультразвуку; *б* - при дії ультразвуку.

### Висновки

Узагальнюючи отримані результати, можна стверджувати, що при УЗ обробці відбувається ріст рухливості  $\mu$  та концентрації  $n$  носіїв струму в

зразках, які мають глибокі центри. Це може бути пов'язано зі стимульованою УЗ дисоціацією таких центрів на більш мілкі донорні центри, а також модифікацією даних центрів атомом домішки, що приводить до росту  $\mu$  і  $n$ , або ж стимульованою дією УЗ на негетерогенно розподілені області просторового заряду  $n$ - і  $p$ -типу провідності.

Показано, що основними акустоактивними дефектами в Si-Cz зразках є модифіковані А-центри ( $E_c - 0,205$  eВ) і дивакансії ( $E_c - 0,26$  eВ). УЗ стимулює “локальну дифузію” окремих домішкових атомів з утворенням нестабільних комплексів, унаслідок чого відбувається часткове відновлення та покращення електрофізичних параметрів опроміненого  $n$ -Si при дії УЗ та тривала релаксація до попереднього стану при виключенні УЗ за декілька діб.

Динамічні (зворотні) зміни концентрації та рухливості в результаті дії УЗ обробки відбуваються в результаті корегованих перетворень дефектних комплексів унаслідок збурення термодинамічної рівноваги системи РД. Для пояснення зміни електричної активності РД у процесі дії УЗ наведено якісну дворівневу енергетичну конфігураційно-координатну модель перерозподілу концентрації дефектів між різними енергетичними станами.

Автори висловлюють вдячність В. І. Хівричу за допомогу в проведенні експерименту та корисне обговорення одержаних результатів.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Подолян А.А., Хіврич В.И. Влияние ультразвука на отжиг радиационных дефектов в кремнии при комнатных температурах // Письма в ЖТФ. - 2005. - Т. 31, вып. 10. - С. 11 - 16.
2. Olikh Ja.M., Olikh O.Ja. Active ultrasound effects and their future usage in sensor electronics // Сенсорна електроніка і мікросистемні технології. - 2004. - № 1. - С. 19 - 29.
3. Конозенко И.Д., Семенюк А.К., Хіврич В.И. Радиационные эффекты в кремнии. - К.: Наук. думка, 1974. - 200 с.
4. Мукашев Б.Н., Абдуллин Х.А., Горелкинский Ю.В. Метастабильные и бистабильные дефекты в кремнии // УФН. - 2000. - Т. 170, № 2. - С. 143 - 155.
5. Воскобойников В.В., Сеница С.П. Омические контакты к кремнию // Приборы и техника эксперимента. - 1967. - № 4. - С. 247 - 248.
6. Зеегер К. Физика полупроводников / Пер. с англ. под ред. Ю. К. Пожелы. - М.: Мир, 1977. - 615 с.
7. Долголенко А.П., Литовченко П.Г., Варенцов М.Д., Гайдар Г.П. Энергетическое положение в запрещенной зоне  $n$ -Si бистабильного дефекта ( $C_iC_s$ )<sup>o</sup> в “В” конфигурации // Зб. наук. праць Ін-ту ядерних досл. - 2003. - № 1(9). - С. 63 - 68.
8. Бабич В.М., Блецькан Н.И., Венгер Е.Ф. Кислород в монокристаллах кремния. - К.: Интерпрес ЛТД, 1997. - 240 с.
9. Бабич В.М., Баран М.П., Кириця В.Л. та ін. Розсіювання носіїв струму у відпалених кристалах кремнію, вирощених за методом Чохральського // УФЖ. - 1994. - Т. 39, № 4. - С. 481 - 485.
10. Неустроев Е.П., Смагулова С.А., Антонова И.В., Сафронов Л.Н. Формирование электрически активных центров в кремнии, облученном электронами, в интервале температур 400 - 700 °С // ФТП. - 2004. - Т. 38, вып. 7. - С. 791 - 795.
11. Brosious P.R. Defects and Radiation Effects in Semiconductors, Nice-1978, Bristol-London, Inst. of Phys. 1979. - No. 46. - P. 248.
12. Баранский П.И., Громашевский В.Л., Дякин В.В. и др. Перестройка центров рассеяния носителей тока в Si под действием ультразвука // Тез. докл. XIII Всесоюз. конф. по акустоэлектронике и квант. акустике, 8 - 10 окт. 1986 г., Черновцы. - К., 1986. - Ч. 2. - С. 33 - 34.

13. Tokumaru Y., Okushi H., Masui T., Abe Y. Deep levels associated with nitrogen in silicon // Jpn. J. Appl. Phys. P. 2. - 1982. - No. 21. - P. L443 - L444.
14. Asghar M., Zafar Iqbal M., Zafar N. Characterization of deep levels introduced by alpha radiation in n-type silicon // J. Appl. Phys. - 1993. - Vol. 73, No. 8. - P. 3698 - 3708.
15. Moll M., Fretwurst E., Kuhnke M., Lindström G. Relation between microscopic defects and macroscopic changes in silicon detector properties after hadron irradiation // Nucl. Instr. and Meth. B. - 2002. - Vol. 186. - P. 100 - 110.
16. Asom M.T., Benton J.L., Sauer R., Kimerling L.C. Interstitial defect reactions in silicon // Appl. Phys. Lett. - 1987. - Vol. 51, No. 4. - P. 256 - 258.
17. Абдуллин Х.А., Мукашев Б.Н., Тамендаров М.Ф. и др. Исследование радиационных дефектов в p-Si методом нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней // ФТП. - 1990. - Т. 24, № 2. - С. 391 - 392.
18. Jellison G.E. Transient capacitance studies of an electron trap at  $E_C - E_T = 0.105$  eV in phosphorus-doped silicon // J. Appl. Phys. - 1982. - Vol. 53, No. 8. - P. 5715 - 5719.
19. Мурин Л.И., Маркевич В.П., Медведева И.Ф., Dobaczewski L. Бистабильность и электрическая активность комплекса вакансия-два атома кислорода в кремнии // ФТП. - 2006. - Т. 40, № 11. - С. 1316 - 1320.

### ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКА НА ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ АКТИВНОСТЬ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В $\gamma$ -ОБЛУЧЕННЫХ КРИСТАЛЛАХ КРЕМНИЯ *n*-ТИПА

В. М. Бабич, А. П. Долголенко, Я. М. Олих, Н. Д. Тимочко

Исследовано влияние ультразвуковой (УЗ) обработки ( $f = 5 \div 15$  МГц,  $W \leq 2$  Вт/см<sup>2</sup>,  $t \approx 10^4$  с) на перестройку радиационных дефектов (РД) в кристаллах *n*-Si с высокой концентрацией кислорода ( $9,5 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>), облученных  $\gamma$ -квантами <sup>60</sup>Со дозами  $10^8$  и  $10^9$  рад. Выявлены изменения температурных (100 - 300 К) зависимостей концентрации  $n(T)$  и подвижности носителей заряда  $\mu(T)$  после проведенных  $\gamma$ -облучений (необратимые изменения) и УЗ обработок (обратные). Из теоретических расчетов  $n(T)$  определены энергетические положения дефектных уровней  $E_a^i$  и их концентрации  $N_a^i$ . Обсуждается возможность акустостимулированной перестройки обнаруженных РД (дивакансии  $V_2^-$ ,  $E_a^1 = (E_c - 0,424$  эВ), модифицированного *A*-центра ( $V - O$ ),  $E_a^2 = (E_c - 0,205$  эВ) и комплекса, что может содержать азот (? + N),  $E_a^3 = (E_c - 0,19$  эВ)) путем изменения конфигурации, структуры и заряженности на примере двухуровневой энергетической конфигурационно-координатной модели.

### ULTRASOUND INFLUENCE ON THE ELECTRICAL ACTIVITY OF RADIATION DEFECTS IN $\gamma$ -IRRADIATED *n*-TYPE SILICON CRYSTALS

V. M. Babych, A. P. Dolgolenko, Ja. M. Olikh, M. D. Tymochko

The effect of the ultrasonic (US) processing in regime ( $f_{US} = 8$  МГц,  $W_{US} = 2$  Вт/см<sup>2</sup>,  $t \approx 10^4$  с) on the transformation of radiation defects (RDs) in  $\gamma$ -irradiated ( $D = 10^8$  and  $10^9$  rad) in Chochralski-grown *n*-type silicon single crystals ( $9,5 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>) has been studied. The changes of the temperature dependence (100–300 K) of concentration  $n(T)$  and mobility  $\mu(T)$  of charge carriers after  $\gamma$ -irradiated (irreversible changes) and US processing (reverse) has been exposed. Energy positions of the defect levels  $E_a^i$  and their concentrations  $N_a^i$  from the theoretical computations were determined. Possibility of acoustostimulated transformation of definite RDs (divacancies  $V_2^-$ ,  $E_a^1 = (E_c - 0.424$  eV), modified *A*-center ( $V - O$ ),  $E_a^2 = (E_c - 0.205$  eV) and complex that can contain nitrogen (? + N),  $E_a^3 = (E_c - 0,19$  eV)) by means of change of configuration, structure and recharge for example two-dimensional energy configuration-coordinate model is considered.

Надійшла до редакції 27.09.06,  
після доопрацювання – 15.02.07.