

ВПЛИВ ДОМІШКИ ОЛОВА НА РЕКОМБІНАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ *n*-КРЕМНІЮ ПРИ  $\gamma$ -ОПРОМІНЕННІ

М.М. КРАСЬКО

Інститут фізики НАН України

(Проп. Науки, 46, Київ 03680; e-mail: krasko@iop.kiev.ua)

УДК 621.315.592  
© 2012

Експериментально досліджено та проаналізовано вплив ізовалентної домішки олова на зміну часу життя нерівноважних носіїв заряду в опроміненому  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  *n*-Si, вирошеному за методом Чохральського (Cz). Виявлено, що поведінка часу життя в  $\gamma$ -опроміненому *n*-Si з Sn визначається вихідною концентрацією вільних електронів ( $n_0$ ). Показано, що із збільшенням концентрації олова константа деградації часу життя ( $k_T$ ) зменшується у низькоомному і збільшується у високоомному *n*-Si. Це пояснюється конкуренцією між основними центрами рекомбінації в *n*-Si з Sn-комплексами VO і SnV. Визначено співвідношення констант реакцій утворення дефектів SnV і VO, а також поперечні перерізи захоплення дірок одно- і двозарядними акцепторними станами SnV.

## 1. Вступ

Ізовалентна домішка олова в кремнії стала предметом інтенсивного дослідження завдяки своїй здатності впливати на генерацію вторинних радіаційних та термічних дефектів. Одне з перших досліджень впливу олова на процеси радіаційного дефектоутворення в кремнії провів ще у 1972 році Vrelot [1], і з того часу виник постійний інтерес до цієї теми (див., наприклад, [2–11]). Актуальними ці дослідження залишаються і останніми роками [12, 13]. Детальний аналіз результатів по впливу олова на термічне та радіаційне дефектоутворення в кремнії проведено нами в оглядовій роботі [14]. І хоча олово в опроміненому кремнії може впливати на утворення радіаційних дефектів міжвузловинного типу (зокрема, на процеси утворення вуглецевих радіаційних дефектів [10–13]), але основні дослідження пов'язані з впливом олова на утворення вакансійних радіаційних дефектів VO центрів і дивакансій  $V_2$ , які в значній мірі є відповідальними за деградацію параметрів кремнію

і приладів на його основі при дії радіації. Олово перехоплює вільні вакансії, які генеруються у кремнії при високоенергетичному опроміненні, і, таким чином, зменшує ефективність утворення інших радіаційних дефектів вакансійного типу. При цьому утворюються комплекси SnV, які стабільні до  $\sim 150^\circ\text{C}$ . Вони є амфотерними дефектами і можуть знаходитись в п'яти зарядових станах ( $2+, +, 0, -, 2-$ ), вносячи в заборонену зону кремнію чотири електронних рівні. Два донорних рівні  $E_v + 0,07$  eV ( $+/+$ ) і  $E_v + 0,32$  eV ( $+/0$ ) було знайдено в нижній половині забороненої зони [3,15]. Також, за даними вимірювання спектрів DLTS, було встановлено два акцепторних рівні SnV з енергіями перезарядки 0,29 eV ( $-/-$ ) і 0,58 eV ( $-/0$ ) [6, 7, 15]. У роботах [7, 15] було показано, що для захоплення електронів на ці рівні в *n*-Si існують енергетичні бар'єри  $\sim 0,08$  eV, і тому SnV має два акцепторних електронних рівня у верхній половині забороненої зони з енергіями  $E_c - 0,214$  eV для  $\text{SnV}^{- - / -}$  і  $E_c - 0,501$  eV для  $\text{SnV}^{- / 0}$ .

Всі ці дослідження більше спрямовані на вивчення властивостей безпосередньо комплексів SnV та впливу олова на утворення інших радіаційних дефектів. Як при цьому змінюються інтегральні параметри опроміненого кремнію з оловом, зокрема, час життя нерівноважних носіїв заряду, практично не досліджено. Так, в [4, 16] під час дослідження впливу електронного опромінення на час життя нерівноважних носіїв заряду в кремнії було встановлено, що при концентрації олова  $(2-4) \cdot 10^{17}$   $\text{cm}^{-3}$  його вплив на зміну часу життя в результаті опромінення залежить від типу легування кристала. В *p*-Si наявність олова пришвидшує процес зменшення часу життя при опроміненні [4], а в *n*-Si сповільнює [16]. Хоча в [17]

було помічено, що збільшення концентрації олова з  $1,7 \cdot 10^{18}$  до  $6,5 \cdot 10^{18}$   $\text{см}^{-3}$  також пришвидшує деградацію часу життя в  $n$ -Si.

Метою даної роботи було встановлення впливу домішки олова на зміну часу життя нерівноважних носіїв заряду в  $n$ -Si, опроміненому  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$ .

## 2. Експеримент

Дослідження проводилися на зразках кремнію  $n$ -типу, легованих оловом у процесі вирощування із розплаву (Cz  $n$ -Si(Sn)). В табл. 1 наведено основні характеристики даних зразків: концентрації олова [Sn], кисню [O], вуглецю [C] та фосфору [P]. Як контрольні використано зразки Cz  $n$ -Si з подібними характеристиками.

Інтервал концентрацій олова, який зустрічається в літературі під час вивчення радіаційного дефектоутворення в Si(Sn), знаходиться в межах  $\sim 10^{17}$ – $10^{19}$   $\text{см}^{-3}$ . Концентрація олова в зразках, характеристики яких наведено в табл. 1, практично перекриває весь розглянутий в літературі діапазон. Крім того, концентрація вільних електронів у цих зразках змінюється в широких межах, що дозволило мати як високо-, так і низькоомний Si(Sn).

В експерименті було використано опромінення  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  інтенсивністю  $J_\gamma \sim 10^{11}$   $\gamma$ -квантів/( $\text{см}^2 \cdot \text{с}$ ). Значення концентрації вільних електронів у зразках визначалось за допомогою ефекту Холла, а часу життя нерівноважних носіїв заряду – по релаксації нерівноважної фотопровідності в умовах низького рівня збудження ( $\leq 5\%$ ). Опромінення і вимірювання було проведено при кімнатній температурі.

Вплив опромінення на рекомбінацію нерівноважних носіїв заряду в кремнії оцінювався за відомим співвідношенням

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_0} + k_\tau \Phi, \quad (1)$$

де  $\tau_0$ ,  $\tau$  – час життя нерівноважних носіїв заряду до і після опромінення відповідно;  $\Phi$  – доза опромінення;  $k_\tau$  – константа деградації часу життя, яка є кількісною характеристикою чутливості кремнію до

Т а б л и ц я 1

Зразок	[Sn], $10^{18}$ $\text{см}^{-3}$	[O], $10^{17}$ $\text{см}^{-3}$	[C], $10^{16}$ $\text{см}^{-3}$	[P], $10^{15}$ $\text{см}^{-3}$
$n$ -Si(Sn-1)	0,2	7,5	$\sim 7$ –8	$\sim 2$
$n$ -Si(Sn-2)	1,7	6,5	$< 5$	$\sim 0,1$
$n$ -Si(Sn-3)	6,5	6,0	$< 5$	$\sim 0,1$

дії радіації. Експериментальне значення  $k_\tau$  для досліджуваних зразків визначалося із лінійних ділянок дозових залежностей величини  $\Delta(1/\tau) = (1/\tau - 1/\tau_0)$ . Це справедливо тоді, коли концентрація радіаційних дефектів, які відповідають за зміну  $k_\tau$ , лінійно залежить від дози опромінення. Тобто, за умови, що концентрація радіаційних дефектів мала порівняно з концентраціями атомів домішок, які беруть участь в утворенні дефектів. В експерименті ця умова виконувалась.

## 3. Результати та їх обговорення

### 3.1. Експериментальні результати

Результати дослідження впливу домішки Sn на зміну часу життя нерівноважних носіїв заряду в  $n$ -Si при  $\gamma$ -опроміненні показано на рис. 1. Тут наведено дозові залежності величини  $\Delta(1/\tau)$  в легованих оловом та контрольних кристалах. Значення константи деградації часу життя  $k_\tau = \Delta(1/\tau)/\Phi$ , визначені з експериментальних залежностей на рис. 1, а також значення  $n_0$  і  $\tau_0$  для цих зразків вказано в табл. 2.

Із рис. 1 і табл. 2 бачимо, що в зразках  $n$ -Si з Sn спостерігається два якісно різних типи поведінки  $k_\tau$  порівняно з контрольним матеріалом: в  $n$ -Si(Sn-1) значення  $k_\tau$  менше, а в  $n$ -Si(Sn-2) і  $n$ -Si(Sn-3), навпаки, більше, ніж в  $n$ -Si без олова. Така поведінка  $k_\tau$  може бути зумовлена не стільки різною концентрацією олова в цих зразках, скільки (чи також) відмінністю у значеннях вихідної концентрації вільних електронів  $n_0$ . Підтвердженням слугує те, що в зразках  $n$ -Si(Sn-2) і  $n$ -Si(Sn-3), які мають майже однакове значення  $n_0$ , відносна зміна  $k_\tau$  не є суттєвою на фоні збільшення концентрації олова в чотири рази.

Тому вплив олова на час життя нерівноважних носіїв заряду в  $\gamma$ -опроміненому  $n$ -Si проаналізуємо з врахуванням не тільки різної концентрації олова, а і різної вихідної концентрації вільних електронів.

Т а б л и ц я 2

Зразок	$n_0$ , $10^{13}$ $\text{см}^{-3}$	$\tau_0$ , мкс	$k_\tau$ , $10^{-12}$ $\text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$
$n$ -Si(Sn-1)	$\sim 200$	70–80	43,1
$n$ -Si-1		100–130	79,8
$n$ -Si(Sn-2)	6,0	100–130	4,4
$n$ -Si-2		60–70	3,0
$n$ -Si(Sn-3)	7,7	50–60	6,1
$n$ -Si-3		70–90	4,0

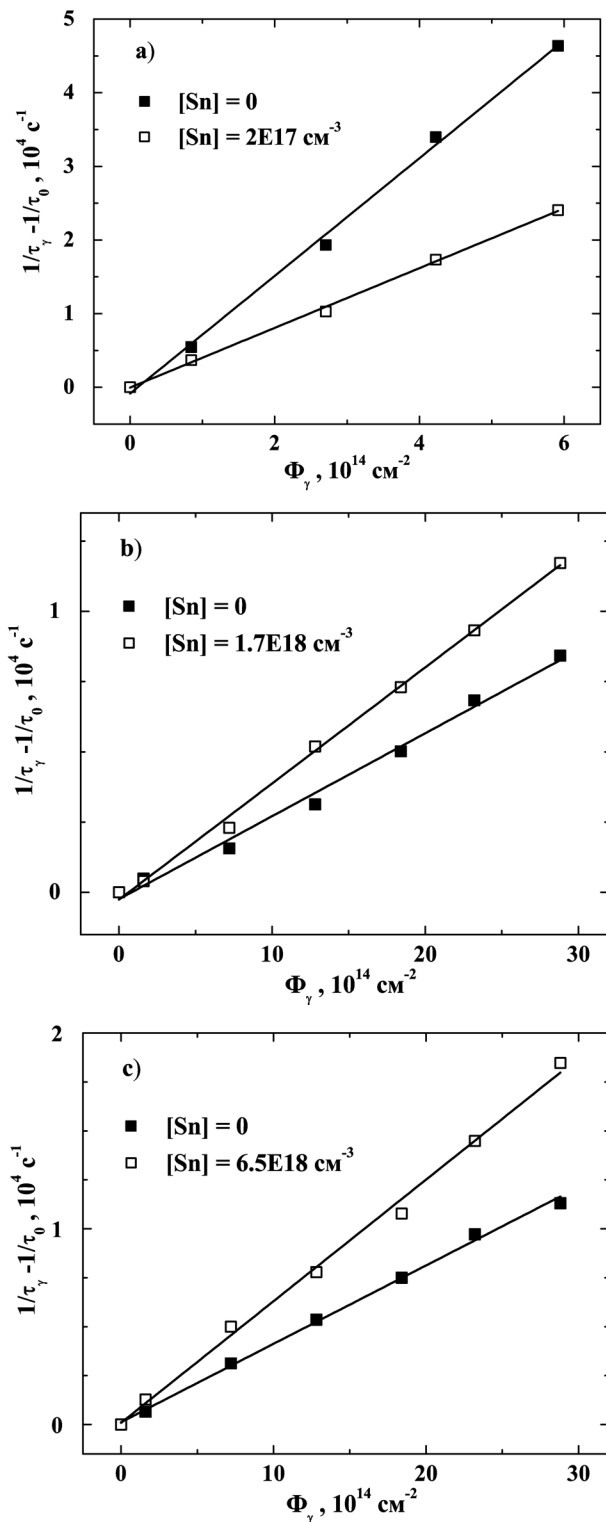


Рис. 1. Залежності величини  $\Delta(1/\tau)$  від дози опромінення  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  для зразків  $n\text{-Si}$ , легованих Sn (точки – експеримент; суцільні криві – лінійна апроксимація)

### 3.2. Кінетика утворення основних вторинних радіаційних дефектів в опроміненому $n\text{-Si}(\text{Sn})$

Основними вторинними радіаційними дефектами, які утворюються в опроміненому Cz  $n\text{-Si}(\text{Sn})$ , є вакансійні комплекси VO, VP і SnV. Тому кінетика зміни концентрації вакансій в опроміненому  $n\text{-Si}(\text{Sn})$  визначається темпом генерації вільних вакансій та процесами захоплення вакансій атомами кисню, фосфору та олова:

$$\frac{d[V]}{dt} = \lambda_V - \chi_{VO}[V][O] - \chi_{VP}[V][P] - \chi_{SnV}[V][\text{Sn}], \quad (2)$$

де  $\lambda_V$  – швидкість генерації вакансій при опромінуванні,  $\chi_{VO}$ ,  $\chi_{VP}$ ,  $\chi_{SnV}$  – константи реакцій утворення комплексів VO, VP та SnV відповідно. Стаціонарна концентрація вакансій буде визначатися, в основному, реакціями вакансій з атомами кисню та олова, концентрації яких набагато більші, ніж фосфору. Тоді маємо

$$[V]_{st} \approx \frac{\lambda_V}{\chi_{VO}[O] + \chi_{SnV}[\text{Sn}]}. \quad (3)$$

І відповідно для кінетики утворення конкретних типів вакансійних дефектів отримуємо

$$\frac{d[VO]}{dt} \approx \lambda_V \left( 1 + \frac{\chi_{SnV}[\text{Sn}]}{\chi_{VO}[O]} \right)^{-1}, \quad (4)$$

$$\frac{d[VP]}{dt} \approx \lambda_V \left( \frac{\chi_{VO}[O]}{\chi_{VP}[P]} + \frac{\chi_{SnV}[\text{Sn}]}{\chi_{VP}[P]} \right)^{-1}, \quad (5)$$

$$\frac{d[\text{SnV}]}{dt} \approx \lambda_V \left( 1 + \frac{\chi_{VO}[O]}{\chi_{SnV}[\text{Sn}]} \right)^{-1}. \quad (6)$$

Як бачимо, ефективності утворення конкретних типів дефектів (і відповідно їх концентрації) визначаються концентраціями відповідних домішок та константами захоплення ними вакансій. Оцінімо, наскільки олово ефективно захоплює вакансії порівняно з іншими домішками в кремнії (киснем, фосфором). Раніше в роботах [6, 14, 17, 18] саме ці зразки було досліджено методом DLTS щодо впливу олова на спектр, ефективність утворення та поведінку при термообробках електрично активних радіаційних дефектів. Підставляючи у вирази (4)–(6) значення концентрацій відповідних домішок (табл. 1) та експериментальні ефективності утворення радіаційних дефектів

(для  $n\text{-Si}\langle\text{Sn-2}\rangle$  і  $n\text{-Si}\langle\text{Sn-3}\rangle$  із роботи [6], а для  $n\text{-Si}\langle\text{Sn-1}\rangle$  із [18]), було визначено співвідношення констант реакцій утворення дефектів, значення яких наведено в табл. 3.

Із табл. 3 бачимо, що олово не має суттєвої переваги порівняно з киснем при захопленні вакансій. Це в певній мірі зрозуміло, оскільки домішки кисню і олова в кремнії є електронейтральними в дисперсному стані і мають майже однакову величину деформаційного заряду ( $A$ ) одного знака (величина  $A$ , яка характеризує зміну об'єму кристала кремнію у результаті дії пружних напружень, які виникають в кремнії при введенні домішок, для кисню становить  $(1,1 \pm 0,1) \cdot 10^{-24} \text{ см}^3$  і для олова –  $(8 \pm 1) \cdot 10^{-25} \text{ см}^3$  [19]). Домішка олова максимум в три рази ефективніше захоплює вакансії порівняно з киснем в  $n\text{-Si}\langle\text{Sn-1}\rangle$ . Це збігається з даними робіт [4,16], які було отримано для кремнію з близькою концентрацією олова. На перший погляд (див. табл. 3), із збільшенням концентрації олова зменшується його здатність захоплювати вакансії. Якщо ця тенденція дійсно має місце, то це може свідчити про неоднорідний розподіл олова при великих концентраціях, оскільки частина олова, яка може знаходитися у скупченнях, не буде брати участь в захопленні вакансій. Слід зазначити, що співвідношення констант реакцій утворення VO і VP центрів  $\chi_{VP}/\chi_{VO} \approx 20$ , як і в попередніх наших [20] та інших [21] дослідженнях.

### 3.3. Вплив олова на зміну часу життя нерівноважних носіїв заряду в $\gamma$ -опромінену $n\text{-Si}$

#### 3.3.1. Основні центри рекомбінації нерівноважних носіїв заряду в $\gamma$ -опроміненому $n\text{-Si}\langle\text{Sn}\rangle$ та їх характеристики

В  $n\text{-Si}$  без Sn, опроміненому  $\gamma$ -квантами, основними центрами рекомбінації при кімнатній температурі є VO центри [20, 21], і для зміни часу життя нерівноважних носіїв заряду можна записати:

$$\frac{1}{\tau} - \frac{1}{\tau_0} = \frac{1}{\tau_{VO}}, \quad (7)$$

де  $\tau_{VO}$  – час життя нерівноважних носіїв заряду, який зумовлений VO центрами.

Т а б л и ц я 3

Зразок	$\chi_{SnV}/\chi_{VO}$	$\chi_{VP}/\chi_{VO}$
$n\text{-Si}\langle\text{Sn-1}\rangle$	$\sim 3$	$\sim 20$
$n\text{-Si}\langle\text{Sn-2}\rangle$	$\sim 1$	–
$n\text{-Si}\langle\text{Sn-3}\rangle$	$\sim 0,8$	–

Утворення дефектів SnV в опроміненому  $n\text{-Si}$ , легуваному Sn, буде впливати на деградацію часу життя нерівноважних носіїв заряду як за рахунок зменшення ефективності утворення VO центрів, так і за рахунок власного внеску SnV:

$$\frac{1}{\tau} - \frac{1}{\tau_0} = \frac{1}{\tau_{VO}^{Sn}} + \frac{1}{\tau_{SnV^{-/0}}} + \frac{1}{\tau_{SnV^{--/-}}}, \quad (8)$$

де  $\tau_{VO}^{Sn}$ ,  $\tau_{SnV^{-/0}}$ ,  $\tau_{SnV^{--/-}}$  – час життя нерівноважних носіїв заряду, який зумовлений VO центрами в  $n\text{-Si}\langle\text{Sn}\rangle$ , та одно- і двозарядними акцепторними станами дефекту SnV відповідно.

У нашому випадку ( $n\text{-Si}$ , низький рівень збудження  $\Delta n \ll n_0$ , рекомбінаційні рівні VO ( $E_c - 0,17 \text{ eV}$ ), SnV $^{--/-}$  ( $E_c - 0,21 \text{ eV}$ ), SnV $^{-/0}$  ( $E_c - 0,50 \text{ eV}$ ) розміщені у верхній половині забороненої зони) час життя нерівноважних носіїв визначається часом життя дірок і для кожного центру рекомбінації справедливий вираз:

$$\tau_i = (\sigma_i v_p N_i)^{-1} \left[ 1 + \frac{N_c \exp(-E_i/kT)}{n_0} \right], \quad (9)$$

де  $\sigma_i$  – поперечний переріз захоплення дірок  $i$ -м рекомбінаційним центром,  $v_p$  – теплова швидкість дірок,  $N_i$  – концентрація центрів,  $E_i$  – глибина електронного рівня  $i$ -го рекомбінаційного центру від дна зони провідності,  $N_c$  – ефективна густина станів у зоні провідності. Враховуючи (7)–(9), із (1) отримуємо вираз для розрахунку  $k_\tau$ :

$$k_\tau = \sum_i \sigma_i v_p \eta_i \left[ 1 + \frac{N_c \exp(-E_i/kT)}{n_0} \right]^{-1}, \quad (10)$$

де  $\eta_i$  – ефективність утворення центрів ( $\eta_i = N_i/\Phi$ ).

У виразі (10) єдиними невідомими параметрами, які необхідно мати, щоб аналізувати вплив олова на зміну часу життя дірок в опроміненому  $n\text{-Si}$ , є поперечні перерізи захоплення дірок  $\sigma_p$  на SnV $^{-/0}$  і SnV $^{--/-}$ . Для їх визначення використаємо отримані із експерименту значення  $k_\tau$  (табл. 2), а ефективності утворення дефектів VO і SnV розрахуємо за допомогою формул (4), (6). При цьому співвідношення констант реакцій утворення дефектів  $\chi_{SnV}\chi_{VO}$  для кожного матеріалу візьмемо із табл. 3. Раніше [20] нами було визначено поперечний переріз захоплення дірок VO центрами  $\sigma_{VO} \approx 2,5 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2$  і ефективність генерації вільних вакансій в  $n\text{-Si}$  при  $\gamma$ -опромінюванні  $\lambda_V \approx 4 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$ . Тоді, за допомогою виразу (10), отримуємо поперечні перерізи захоплення дірок на SnV $^{-/0}$  і SnV $^{--/-}$ . Значення цих величин наведено в табл. 4.

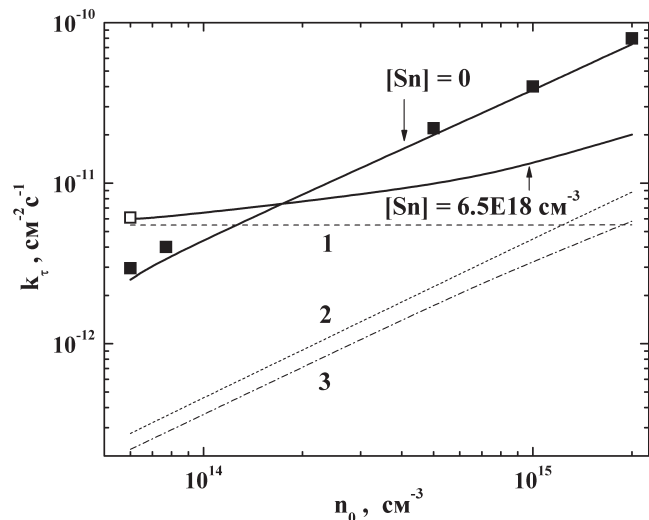


Рис. 2. Експериментальні (точки) та розрахункові (суцільні криві) залежності  $k_t$  від концентрації вільних електронів для  $\gamma$ -опромінених  $n$ -Si та  $n$ -Si<Sn-3>. Суцільна лінія для  $n$ -Si – внесок VO, а для  $n$ -Si<Sn-3> – сумарний внесок складових: 1 –  $\text{SnV}^{-/0}$ , 2 – VO, 3 –  $\text{SnV}^{-/-}$

Як бачимо із табл. 4, значення перерізів захоплення дірок на дефект SnV видаються дещо замалими, порівняно з VO центрами. В  $n$ -Si SnV є акцептором, а отримані величини  $\sigma_p$  відповідають більше захопленню дірок на нейтральний дефект. Однак, в [7,15] показано, що для захоплення електронів на рівні SnV в  $n$ -Si існують енергетичні бар'єри  $\sim 0,08$  еВ. Подібні бар'єри можуть бути і для захоплення дірок. Тоді поведінка  $\sigma_p$  від температури  $T$  буде описуватися виразом  $\sigma_p = \sigma_0 \exp(-\Delta E/kT)$ . Якщо припустити, що для  $\text{SnV}^{-/0} \sigma_0 = 2,5 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2$ , оскільки  $\sigma_p$  для  $\text{VO}^{-/0}$ , то отримуємо, що енергетичний бар'єр для захоплення дірок на однозарядний стан дефекту SnV  $\Delta E \approx 0,14$  еВ.

3.3.2. Аналіз впливу Sn на час життя нерівноважних носіїв заряду в  $\gamma$ -опроміненому  $n$ -Si<Sn>

За допомогою виразу (10), використовуючи отримані значення  $\sigma_p$  і  $\eta_k$  для дефектів, було розраховано залежності  $k_t$  від концентрації вільних електронів  $n_0$  для кожного матеріалу. На рис. 2 наведено залежності  $k_t(n_0)$  для  $\gamma$ -опромінених  $n$ -Si та  $n$ -Si<Sn-3>, який має найбільшу концентрацію олова, в інтервалі концентрацій вільних електронів  $n_0 = 6 \cdot 10^{13} - 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Було враховано, що основними центрами рекомбінації в  $n$ -Si є VO центри, а в  $n$ -Si з Sn деградація часу життя визначається сумарним внеском  $\text{SnV}^{-/0}$ ,  $\text{SnV}^{-/-}$

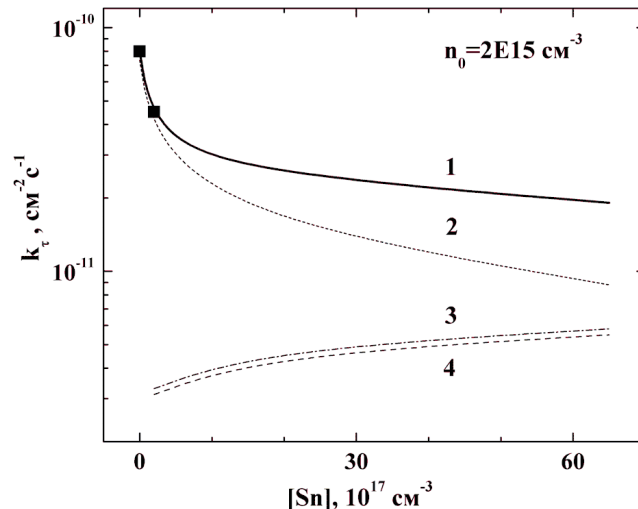


Рис. 3. Розрахункова залежність (крива 1) впливу концентрації олова на  $k_t$  для  $\gamma$ -опроміненого низькоомного  $n$ -Si<Sn>. Залежність 1 – сумарний внесок складових: 2 – VO, 3 –  $\text{SnV}^{-/-}$ , 4 –  $\text{SnV}^{-/0}$ . Точки – експеримент

і VO. З рис. 2 видно, що відносна зміна  $k_t$  в легуваному оловом і контрольному  $n$ -Si залежить від вихідної концентрації вільних електронів. У високоомній області ( $n_0 < 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ) значення  $k_t$  більше в  $n$ -Si, легуваному Sn, порівняно з контрольними зразками, а в більш низькоомній області ( $n_0 > 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ), навпаки. Тоді вплив різних концентрацій олова на константу деградації часу життя розглянемо для максимального ( $n_0 = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ) і мінімального ( $n_0 = 6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ) значень концентрації вільних електронів. Відповідні результати наведено на рис. 3 і 4. Бачимо, що олово зменшує деградацію часу життя у низькоомному  $n$ -Si (рис. 3, крива 1) і збільшує у високоомному (рис. 4, крива 1). При цьому, ці процеси відбуваються ефективніше у зразках з більшою концентрацією олова. Проаналізуємо результати, які наведено на рис. 2–4 з точки зору впливу олова.

А. Високоомний  $n$ -Si<Sn>. Як видно з рис. 2 (крива 1) і рис. 4 (крива 4), у високоомному  $n$ -Si з Sn основним рекомбінаційним центром виступає  $\text{SnV}^{-/0}$  і тоді

Таблиця 4

Зразок	Дефект	$\sigma_p, \text{ см}^2$
$n$ -Si	$\text{VO}^{-/0}$	$\sim 2,5 \cdot 10^{-13}$
	$\text{VO}^{-/0}$	$\sim 2,5 \cdot 10^{-13}$
$n$ -Si<Sn>	$\text{SnV}^{-/-}$	$\sim 5 \cdot 10^{-15}$
	$\text{SnV}^{-/0}$	$\sim 1 \cdot 10^{-15}$

із (10) отримуємо, що

$$k_{\tau} \approx \sigma_p^{\text{SnV}^{-/0}} v_p \eta_{\text{SnV}^{-/0}}. \quad (11)$$

У цьому випадку олово може впливати на  $k_{\tau}$  за рахунок зміни ефективності утворення дефектів SnV. Тобто, збільшення концентрації олова приведе до росту ефективності утворення SnV (див. вираз (6)) і відповідно збільшить  $k_{\tau}$ , що і видно на рис. 4 (крива 1). Порівнюючи абсолютні значення  $k_{\tau}$  для контрольного і легованого оловом  $n$ -Si (для обох матеріалів  $n_0 = 6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ), бачимо, що ці значення є близькими, хоча й деградація часу життя в  $n$ -Si з Sn відбувається трохи швидше (рис. 1, b, 2 і 4). Це пояснюється тим, що, завдяки глибшому розташуванню рівня у забороненій зоні кремнію,  $\text{SnV}^{-/0}$  (основний центр рекомбінації в  $n$ -Si з Sn) заповнений електронами при кімнатній температурі приблизно на два порядки більше, ніж VO (основний центр рекомбінації в  $n$ -Si без Sn), який, в свою чергу, має настільки ж більший переріз захоплення дірок (табл. 4). Якщо  $n_0$  буде меншим, ніж  $6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ , то відношення  $k_{\tau}$  в легованому оловом і контрольному  $n$ -Si має зростати, оскільки заселеність електронами рівня  $\text{SnV}^{-/0}$  не змінюватиметься, а рівня VO зменшуватиметься. На рис. 2 ця тенденція уже помітна.

**В. Низькоомний  $n$ -Si(Sn).** Із ростом концентрації вільних електронів  $n_0$  збільшується заповнення електронами рівнів  $\text{SnV}^{-/-}$  і VO та, відповідно, їх відносний внесок у процес рекомбінації дірок (рис. 2). При цьому,  $k_{\tau}$  в  $n$ -Si з Sn буде меншим, ніж в  $n$ -Si без Sn незалежно від того, який з дефектів SnV чи VO буде основним центром рекомбінації. Оскільки при їх утворенні атоми олова і кисню є конкуруючими стоками для вакансій, і, крім того, обидва рівні дефекту SnV мають менші перерізи захоплення дірок. Як ілюстрація сказаного вище, на рис. 3 показано вплив олова на  $k_{\tau}$  в  $\gamma$ -опромінену  $n$ -Si(Sn) з концентрацією вільних електронів  $n_0 = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . У цьому  $n$ -Si(Sn) основними рекомбінаційними дефектами є VO центри, і тому з (9) отримуємо, що

$$k_{\tau} \approx \sigma_p^{\text{VO}} v_p \eta_{\text{VO}} \left[ 1 + \frac{N_c \exp(-E_{\text{VO}}/kT)}{n_0} \right]^{-1}. \quad (12)$$

Із (12) видно, що поведінка  $k_{\tau}$  буде визначатися тільки ефективністю утворення VO центрів. Збільшення концентрації олова приведе до зменшення ефективності утворення VO центрів (див. вираз (4)), і, відповідно,  $k_{\tau}$  (рис. 3, крива 1).

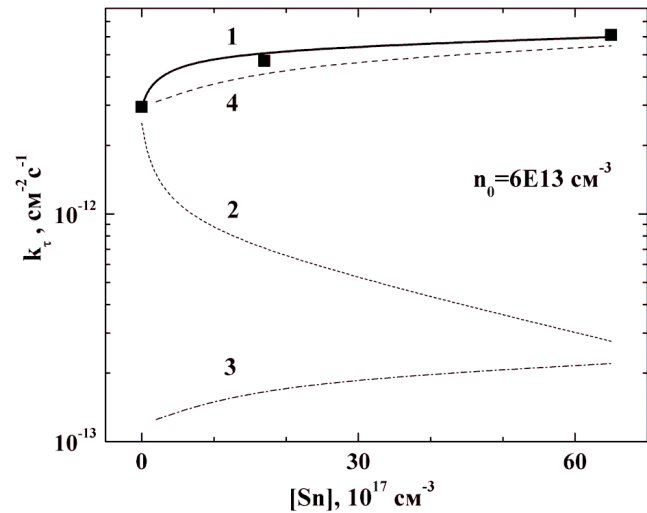


Рис. 4. Розрахункова залежність (крива 1) впливу концентрації олова на  $k_{\tau}$  для  $\gamma$ -опроміненого високоомного  $n$ -Si(Sn). Точки – експеримент. Позначення такі самі, як на рис. 3

#### 4. Висновки

Досліджуючи вплив ізовалентної домішки олова в інтервалі  $(0,2 - 6,5) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  на зміну часу життя нерівноважних носіїв заряду в опромінену  $n$ -Si встановлено, що:

- поведінка часу життя в опромінену  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$   $n$ -Si з Sn залежить від вихідної концентрації вільних електронів. Показано, що із збільшенням концентрації олова константа деградації часу життя зменшується у низькоомному і збільшується у високоомному  $n$ -Si. Це пояснюється конкуренцією між основними центрами рекомбінації в  $n$ -Si з Sn – комплексами VO і SnV. Визначено поперечні перерізи захоплення дірок одно- і двозарядними станами дефекту SnV. Для  $\text{SnV}^{-/0}$  переріз захоплення дірок дорівнює  $\sim 1 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ , а для  $\text{SnV}^{-/-}$  –  $5 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ ;
- співвідношення констант реакцій утворення дефектів SnV і VO  $\chi_{\text{SnV}} \chi_{\text{VO}} \approx 0,8-3$ . Спостерігається тенденція, що із збільшенням концентрації олова зменшується його здатність захоплювати вакансії. Це може свідчити про неоднорідний розподіл олова при великих концентраціях.

1. A. Brelot, IEEE Trans. Nucl. Sci. **19**, 220 (1972).
2. G.D. Watkins, Phys. Rev. B **12**, 4383 (1975).
3. G.D. Watkins and J.R. Troxel, Phys. Rev. Lett. **44**, 593 (1980).
4. В.В. Неймаш, М.Г. Соснин, Б.М. Туровский, В.И. Шаховцов, В.Л. Шиндич, ФТП **16**, 901 (1982).

5. B.G. Svensson, J. Svensson, J.L. Lindström, G. Davies, and J.V. Corbett, *Appl. Phys. Lett.* **51**, 2257 (1987).
6. E. Simoen, C. Claeys, V.B. Neimash, A. Kraitchinskii, M. Kras'ko, O. Puzenko, A. Blondeel, and P. Clauws, *Appl. Phys. Lett.* **76**, 2838 (2000).
7. A.N. Larsen, J.J. Goubet, P. Mejlholm, J.S. Christensen, M. Fanciulli, H.P. Gunnlaugsson, G. Weyer, J.W. Petersen, A. Resende, M. Kaukonen, R. Jones, S. Öberg, P.R. Briddon, B.G. Svensson, J.L. Lindström, and S. Dannefaer, *Phys. Rev. B* **62**, 4535 (2000).
8. M. Fanciulli and J.R. Byberg, *Phys. Rev. B* **61**, 2657 (2000).
9. M. Kaukonen, R. Jones, S. Öberg, and P.R. Briddon, *Phys. Rev. B* **64**, 245213 (2001).
10. E.V. Lavrov, M. Fanciulli, M. Kaukonen, R. Jones, and P.R. Briddon, *Phys. Rev. B* **64**, 125212 (2001).
11. Л.И. Хируненко, О.А. Кобзарь, Ю.В. Помозов, М.Г. Соснин, Н.А. Трипачко, *ФТП* **37**, 304 (2003).
12. М.И. Гриценко, О.О. Кобзар, Ю.В. Помозов, М.Г. Соснин, Л.И. Хируненко, *УФЖ* **55**, 223 (2010).
13. Ch.A. Londos, A. Andrianakis, D. Aliprantis, E.N. Sgourou, and H. Ohyama, *Phys. Status Solidi C* **8**, 701 (2011).
14. C. Claeys, E. Simoen, V.B. Neimash, A. Kraitchinskii, M. Kras'ko, O. Puzenko, A. Blondeel, and P. Clauws, *J. Electrochem. Soc.* **148**, G738 (2001).
15. J.J. Goubet, J.S. Christensen, P. Mejlholm, and A.N. Larsen, in *Proceedings of the 2-nd ENDEASD Workshop*, edited by C. Claeys (Kista-Stockholm, Sweden, 2000), p. 137.
16. Ю.М. Добровинский, М.Г. Соснин, В.М. Цмоць, В.И. Шаховцов, В.Л. Шиндич, *ФТП* **22**, 1149 (1988).
17. E. Simoen, C. Claeys, A.M. Kraitchinskii, M.M. Kras'ko, V.B. Neimash, and L.I. Shpinar, *Solid State Phenom.* **82–84**, 425 (2002).
18. M.L. David, E. Simoen, C. Claeys, V. Neimash, M. Kras'ko, A. Kraitchinskii, V. Voytovych, A. Kabaldin, and J.F. Barbot, *J. Phys. Condens. Matter* **17**, S2255 (2005).
19. В.Е. Кустов, М.Г. Мильвидский, Ю.Г. Семенов, Б.М. Туровский, В.И. Шаховцов, В.Л. Шиндич, *ФТП* **20**, 270 (1986).
20. М.М. Красько, В.Б. Неймаш, А.М. Крайчинський, А.Г. Колосюк, О.М. Кабалдин, *УФЖ* **53**, 686 (2008).

21. А.С. Зубрилов, С.В. Ковешников, *ФТП* **25**, 1332 (1991).

Одержано 10.04.12

ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСИ  
ОЛОВА НА РЕКОМБИНАЦИОННЫЕ  
ХАРАКТЕРИСТИКИ *n*-Si ПРИ  $\gamma$ -ОБЛУЧЕНИИ

*Н.Н. Красько*

Резюме

Экспериментально исследовано и проанализировано влияние изовалентной примеси олова на изменение времени жизни неравновесных носителей заряда в облученном  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  Cz *n*-Si. Обнаружено, что поведение времени жизни в  $\gamma$ -облученном *n*-Si с Sn определяется исходной концентрацией свободных электронов  $n_0$ . Показано, что с увеличением концентрации олова константа деградации времени жизни  $k_T$  уменьшается в низкоомном и увеличивается у высокоомном *n*-Si. Это объясняется конкуренцией между основными центрами рекомбинации в *n*-Si с Sn-комплексами VO и SnV. Определено соотношение констант реакций образования дефектов SnV и VO, а также поперечные сечения захвата дырок одно- и дво-зарядными акцепторными состояниями SnV.

INFLUENCE OF TIN IMPURITY ON RECOMBINATION  
CHARACTERISTICS IN  $\gamma$ -IRRADIATED *n*-Si

*М.М. Kras'ko*

Institute of Physics, Nat. Acad. Sci. of Ukraine  
(46, *Prosp. Nauky, Kyiv 03680, Ukraine;*  
*e-mail: kras'ko@iop.kiev.ua*)

Summary

The influence of the isovalent tin impurity on the lifetime of nonequilibrium charge carriers in Cz *n*-Si irradiated with  $\gamma$ -quanta from  $^{60}\text{Co}$  has been studied experimentally and analyzed. The behavior of the lifetime in  $\gamma$ -irradiated tin-doped *n*-Si was shown to be governed by the initial concentration of free electrons,  $n_0$ . The lifetime degradation factor  $k_T$  is demonstrated to decrease in the low-resistance and to increase in the high-resistance *n*-Si samples, as the tin concentration in them grows. This fact can be explained by a competition of the main recombination centers in *n*-Si with Sn-complexes VO and SnV. The ratio between the reaction constants for the formation of VO and SnV defects is determined, as well as the cross-sections of hole capture by single- and double-charged acceptor states of SnV.