

ЕФЕКТИВНІСТЬ ВЗАЄМОДІЇ МІЖВУЗЛОВИННОГО ВУГЛЕЦЮ З КИСНЕМ, ОЛОВОМ І ВУГЛЕЦЕМ ЗАМІЩЕННЯ В ОПРОМІНЕНОМУ КРЕМНІЇ

М.І. ГРИЦЕНКО,¹ О.О. КОВЗАР,¹ Ю.В. ПОМОЗОВ,² М.Г. СОСНІН,²
Л.І. ХИРУНЕНКО²

¹Чернігівський державний педагогічний університет ім. Т.Г. Шевченка
(Вул. Гетьмана Полуботка, 53, Чернігів; e-mail: o. a. kobzar@gmail.com)

²Інститут фізики НАН України
(Просп. Науки, 46, Київ 03680)

УДК 621.315.592
© 2010

У роботі методом інфрачервоної фур'є-спектроскопії проведено дослідження ефективності взаємодії міжвузловинного вуглецю з основними технологічними домішками кремнію – киснем та вуглецем заміщення, а також з ізоелектронною домішкою – оловом. Показано, що ймовірності взаємодії міжвузловинного вуглецю з міжвузловинним киснем та вузловим вуглецем є близькими за величиною. Виявлено, що міжвузловинний вуглець у Si, легуваному оловом, має меншу термічну стабільність, ніж у кремнії, і температура його остаточного відпалу поступово знижується при зростанні концентрації олова. Показано, що ймовірність взаємодії міжвузловинного вуглецю з оловом у $\sim 2,3$ раза перевищує ймовірність його взаємодії з киснем та вузловим вуглецем.

ється власними міжвузлями з вузлів у міжвузловинне положення з утворенням стабільного дефекту (C_i). Відпалюється C_i поблизу кімнатної температури ($T \approx 310$ К) шляхом дифузії. При дифузії у ґратці міжвузловинний вуглець ефективно взаємодіє з домішками, утворюючи велике різноманіття електрично активних дефектів міжвузловинного типу. У кремнії, вирощеному за методом Чохральського, C_i ефективно взаємодіє з міжвузловинним киснем (O_i), вузловим вуглецем (C_s), власними міжвузлями (Si_i), домішками III чи V груп, при взаємодії з якими утворюються комплекси, відповідно, C_iO_i , C_iC_s , C_iSi_i , $C_i + (III, V)_s$ [4–6, 12, 13]. Нещодавно було виявлено, що C_i у кремнії ефективно взаємодіє з атомами ізоелектронних домішок олова та германію з утворенням стійких комплексів C_iSn_s , C_iGe_s [14–19], хоча C_i , Sn і Ge створюють у ґратці кремнію деформації одного знаку.

1. Вступ

Вуглець у кремнії є технологічною електрично пасивною ізоелектронною домішкою. Однак при різних технологічних обробках (термообробки, опромінення) вуглець ефективно взаємодіє з дефектами структури, утворюючи електрично активні комплекси, які суттєво впливають на параметри матеріалів та приладів, виготовлених на їх основі. Властивості вуглецю у кремнії як у вирощених кристалах, так і після термічних та радіаційних обробок широко вивчалися протягом кількох десятиліть [1–13]. Однак, незважаючи на інтенсивні дослідження, багато питань щодо впливу вуглецю на процеси радіаційного і термічного дефектоутворення й досі лишаються нез'ясованими. Отримання нової інформації про властивості вуглецю важливе як з фундаментальної, так і з практичної точок зору, оскільки легування вуглецем нині широко застосовується в нанотехнологіях для створення, наприклад, релаксованих шарів Si:Ge на Si.

При радіаційному опроміненні вуглець, відповідно з обмінним механізмом Воткінса [3], виштовху-

ється питанню щодо ймовірності взаємодії міжвузловинного вуглецю з різними стоками у ґратці кремнію неодноразово обговорювалось у літературі, але наявні дані неоднозначні. Так, наприклад, згідно з даними [6] відношення радіусів захоплення C_i міжвузловинним киснем та вузловим вуглецем, які визначають ймовірності взаємодії, становить 0,3, а в [8] зазначається, що це співвідношення становить 3. Відсутні дані щодо ефективності взаємодії C_i з атомами ізоелектронних домішок Sn і Ge у кремнії, інтерес до яких останнім часом зріс у зв'язку з розробкою матеріалів для виготовлення швидкодійних приладів. У даній роботі проводиться дослідження порівняльної ефективності взаємодії міжвузловинного вуглецю з атомами вузлового вуглецю, кисню та олова.

Дослідження ефективності взаємодії міжвузловинного вуглецю з різними стоками важливі для розробки керуючого впливу на дефектний склад матеріалу, оскільки дефекти, що утворюються за участі атомів

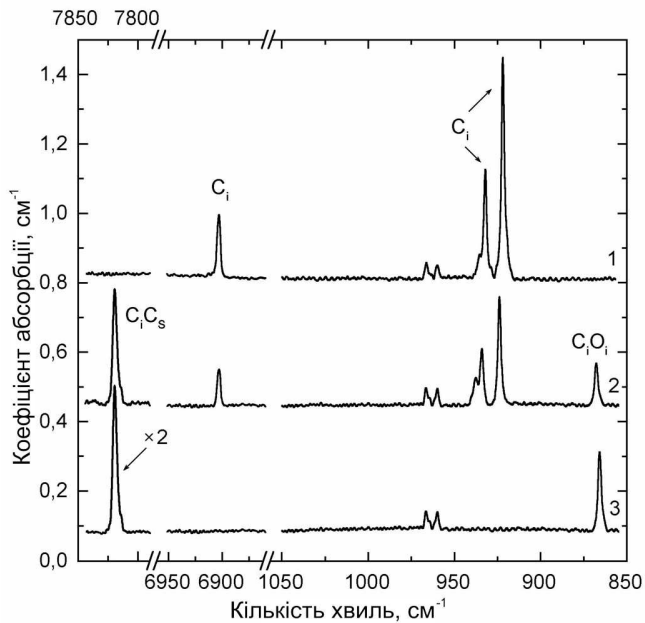


Рис. 1. Трансформація спектра поглинання при відпалі опроміненого електронами Si. $\Phi_e = 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$, $N_O = 6,9 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $N_C = 6,6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Температура відпалу T_{ann} , К: 1 – 250; 2 – 287, 3 – 305

C_i , є електрично активними і значною мірою впливають на електрофізичні параметри кремнію.

2. Зразки та методика експерименту

У роботі досліджували монокристалічні зразки кремнію *n*-типу (леговані фосфором), вирощені за методом Чохральського. Концентрацію фосфору визначали із вимірювань ефекту Хола, вона становила $(2-3) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Вміст олова в Si:Sn визначали нейтронно-активаційним аналізом, а також за допомогою рентгенівського мікроаналізатора JСХА-733. Концентрації кисню та вуглецю визначали за інтенсивностями ліній поглинання 1107 і 607 см^{-1} , відповідно до [11, 20]. Параметри досліджуваних зразків наведено в таблиці.

Зразки опромінювали електронами з енергією 5 МеВ при температурі близько 90 К на мікротроні М-30. Доза опромінення становила $6 \cdot 10^{17} - 10^{18} \text{ см}^{-2}$. Ефективності взаємодії міжвузловинного вуглецю з домішками вивчали за ізохронним (20 хв) відпалом опромінених зразків в інтервалі температур 240–380 К із кроком 10 К. Спектри поглинання зразків досліджували за допомогою фур'є-спектрометра IFS-113v. Вимірювання проводили при температурі 10 К з роздільною здатністю $0,5 \text{ см}^{-1}$.

3. Експериментальні результати та їх аналіз

3.1. Взаємодія C_i з міжвузловинним киснем та вузловим вуглецем

Основними стоками для дифундуючого при відпалі міжвузловинного вуглецю у кремнії, вирощеному за методом Чохральського, як відомо, є міжвузловинний кисень та вуглець заміщення, в результаті чого утворюються комплекси C_iO_i та C_iC_s відповідно. Ефективність утворення комплексів пропорційна концентраціям взаємодіючих компонент, тому при концентрації кисню (N_O), значно більшій за концентрацію вуглецю (N_C), основною пасткою для C_i буде кисень, а при умові $N_C \gg N_O$ міжвузловинний вуглець буде більш ефективно взаємодіяти з C_s . Концентрація кисню у кремнії, вирощеному за Чохральським, часто або перевищує вміст вуглецю, або ж вони є близькими. В останньому випадку наявна конкуренція взаємодій C_i з обома домішками. Для оцінки ймовірностей взаємодії C_i з O_i та C_s у роботі використовували зразки із близькими вихідними концентраціями кисню й вуглецю (див. таблицю). На рис. 1 наведено спектр поглинання, зареєстрований при 10 К для зразка, опроміненого при $T \approx 90 \text{ К}$ дозою $\Phi_e = 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ і відпаленого до 250 К, а також його трансформація після подальшого відпалу міжвузловинного вуглецю. Як видно з рис. 1, при $T_{\text{ann}} = 250 \text{ К}$ (крива 1) у спектрі спостерігаються інтенсивні лінії поглинання з частотами 922, 932 і 6903 см^{-1} , що відповідають міжвузловинному вуглецю [6]. Менш інтенсивні лінії з частотами 960 і 966 см^{-1} відповідають центрам C_iSi_i [12]. При відпалі C_i (криві 2 і 3) у спектрі синхронно з'являються лінії, відповідні комплексам C_iO_i (865,9 см^{-1}) і C_iC_s (7819,2 см^{-1}) [4–6]. Температура повного відпалу C_i становить близько 305 К.

Використовуючи отримані дані, за інтенсивностями ліній поглинання, що відповідають комплексам C_iO_i та C_iC_s (865,9 і 7819,2 см^{-1}), було визначено їх концентрації з використанням коефіцієнтів, відповідно, $5,6 \cdot 10^{16}$ і $1,47 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ [6, 21]. Оцінки показу-

Концентрації олова, кисню та вуглецю у зразках

Зразок	$N_{\text{Sn}}, 10^{18} \text{ см}^{-3}$	$N_O, 10^{17} \text{ см}^{-3}$	$N_C, 10^{17} \text{ см}^{-3}$
Si	–	6,9	6,6
Si:Sn-1	2	8,5	0,3
Si:Sn-2	3	6,4	0,47
Si:Sn-3	6	6,5	1,4
Si:Sn-4	18	5,5	2,7

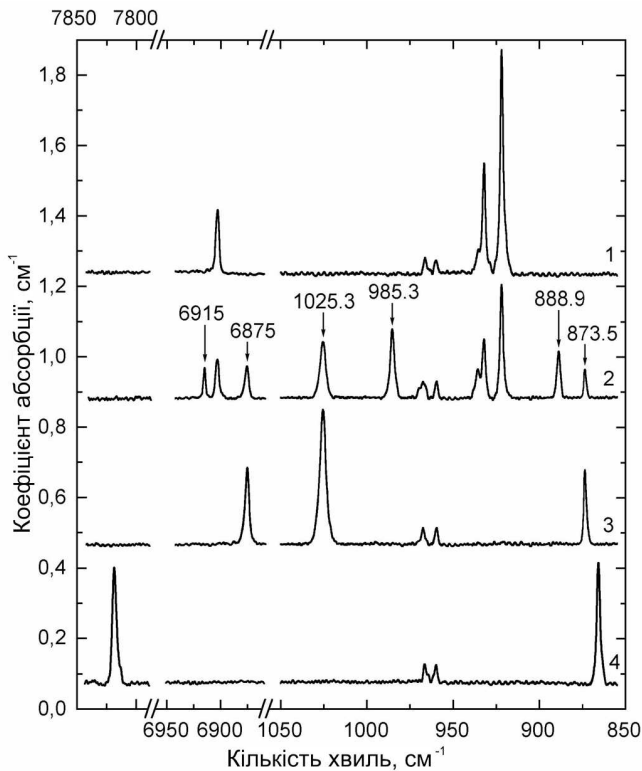


Рис. 2. Трансформація спектра поглинання при відпалі опроміненого електронами Si:Sn. $\Phi_e = 6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, $N_{\text{Sn}} = 1,8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, $N_{\text{C}} = 2,7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Температура відпалу T_{ann} , К: 1 – 240; 2 – 260; 3 – 305; 4 – 380

ли, що концентрація C_iO_i становить $1,22 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, а концентрація C_iC_s – $1,27 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Отже, отримані результати свідчать про те, що концентрації обох центрів порівнянні між собою, тобто співвідношення ймовірностей утворення цих центрів близьке до 1, а не до 0,3 (робота [6]) і не до 3 (робота [8]).

Варто зазначити, що, зазвичай, наведені у літературі значення концентрацій комплексів C_iO_i та C_iC_s оцінюються в області кімнатних температур відпалу після повного зникнення міжвузловинного вуглецю. У роботі [22] було показано, що при повному відпалі центрів C_i концентрація комплексів C_iO_i не досягає максимуму, оскільки значна частина C_i входить до складу так званих “передвісників” C_iO_i , які при підвищенні температури до $\sim 340 \text{ К}$ трансформуються у стабільну конфігурацію C_iO_i . Оцінене з отриманих експериментальних даних співвідношення концентрацій C_iO_i і C_iC_s для зразків, відпалених до $T_{\text{ann}} = 340 \text{ К}$, становить 1,3.

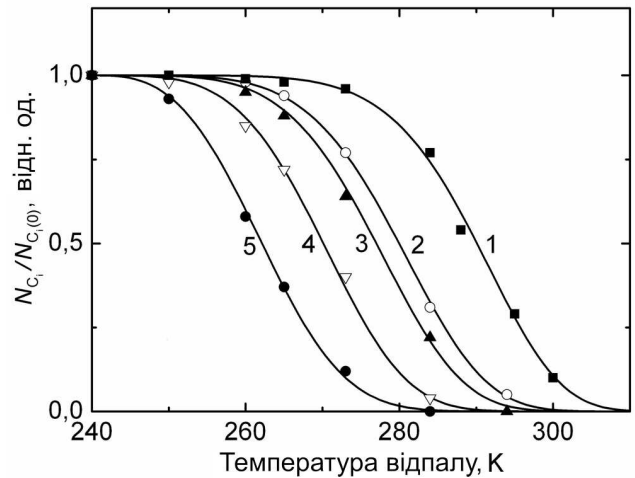


Рис. 3. Відносна зміна концентрації міжвузловинного вуглецю при ізохронному відпалі опроміненних кристалів Si:Sn. N_{Sn} , 10^{18} см^{-3} : 1 – 0; 2 – 2; 3 – 3; 4 – 6; 5 – 18

3.2. Взаємодія C_i з оловом

Ефективним стоком для міжвузловинного вуглецю у кремнії є також олово [14–18], хоча олово має ковалентний радіус ($1,44 \text{ \AA}$), більший за радіус матриці ($1,17 \text{ \AA}$), і ефективно взаємодіє з вакансіями [2]. На рис. 2 наведено трансформацію спектра поглинання для Si:Sn (крива 1) при ізохронному відпалі в інтервалі температур 240–380 К. Як видно з рис. 2, при відпалі міжвузловинного вуглецю ($T_{\text{ann}} > 250 \text{ К}$) в Si:Sn, на відміну від Si, не спостерігається поява ліній поглинання, що відповідають C_iO_i та C_iC_s , а виникає шість ліній поглинання, відповідних комплексам $C_i\text{Sn}$. Згідно з [16–18] лінії з частотами 888,9; 985,3 і 6915 см^{-1} відповідають менш стабільній конфігурації даних центрів і відпалюються за $T_{\text{ann}} \approx 280 \text{ К}$, а лінії 873,5; 1025,3 і 6875 см^{-1} – більш стабільній і відпалюються за $T_{\text{ann}} \approx 380 \text{ К}$. Значне зростання інтенсивності ліній, відповідних центрам C_iO_i та C_iC_s , в Si:Sn спостерігається лише при відпалі комплексів $C_i\text{Sn}$ в області температур $T_{\text{ann}} = 325\text{--}380 \text{ К}$.

Використовуючи отримані при ізохронному відпалі опроміненних зразків результати, було побудовано залежності інтенсивності ліній поглинання, відповідних C_i , від температури відпалу для Si (крива 1) та Si:Sn (криві 2–5), подані на рис. 3. Як видно з рис. 3, міжвузловинний вуглець у Si легованому оловом є менш термостабільним, ніж у Si, і температура початку відпалу C_i тим нижча, чим більший вміст Sn в зразках. Так, при $N_{\text{Sn}} = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ відпал починається при $T_{\text{ann}} \approx 255 \text{ К}$, а при $N_{\text{Sn}} = 1,8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ – при $T_{\text{ann}} \approx 245 \text{ К}$. На рис. 3 також продемонстровано

но, що в порівнянні з кремнієм спостерігається також значне зниження температури повного відпалу C_i зі зростанням вмісту олова.

Проведено кількісну оцінку ефективності захоплення дифундуючих атомів C_i домішковими атомами Sn порівняно з імовірностями захоплення на такі стоки, як O_i та C_s . Зробити це безпосередньо за результатами вимірювань виявилось неможливим, оскільки досліджувані зразки Si:Sn містили різні концентрації вуглецю, а утворення комплексів C_iO_i та C_iC_s при відпалі C_i зареєстровано лише в одному зразку з мінімальним вмістом Sn. Тому для оцінки ефективності захоплення C_i атомами Sn застосовано наближення квазіхімічних реакцій [23]. Як відомо, процес відпалу міжвузловинного вуглецю у кремнії може бути представлений за допомогою реакцій [4–6]:



За наявності олова має місце також реакція



З урахуванням реакцій (1)–(3) процес відпалу C_i з часом у кристалах Si:Sn може бути описаний за допомогою кінетичного рівняння

$$\frac{dN_{C_i}}{dt} = -\chi_{C_i, O_i} N_{C_i} N_{O_i} - \chi_{C_i, C_s} N_{C_i} N_{C_s} - \chi_{C_i, Sn} N_{C_i} N_{Sn}, \quad (4)$$

де N – концентрації взаємодіючих дефектів, χ – ймовірності реакцій між відповідними компонентами.

У роботах [23, 24] було показано, що при відпалі дефектів шляхом дифузії до нерухомих стоків ймовірності реакцій χ можуть бути представлені у вигляді

$$\chi = 4\pi D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) r, \quad (5)$$

де E_a – енергія активації дифузії, k – стала Больцмана, T – абсолютна температура, r – ефективний радіус захоплення стоком дифундуючої компоненти, а $D_0 = z\nu_0 l^2$, де z – ціле число, яке залежить від типу кристалічної ґратки, ν_0 – частота теплових коливань, l – міжатомна відстань.

Враховуючи (5), рівняння (4) можна представити в такому вигляді:

$$\frac{dN_{C_i}}{dt} = -4\pi D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) N_{C_i} \sum_m r_{C_i, m} N_m, \quad (6)$$

де N_m – концентрації відповідних стоків.

Для подальшого аналізу рівняння (6) необхідно встановити явну залежність температури відпалу від часу $T = f(t)$. Оскільки температура змінюється східчасто, доцільно застосувати лінійну апроксимацію [25]:

$$T = T_0 + at, \quad (7)$$

де $a = \Delta T / \Delta t$ – середня швидкість зростання температури відпалу.

Якщо у процесі відпалу величина a залишається сталою, то згідно з [25] апроксимація вигляду (7) практично не впливає на кінцевий результат.

Інтегруючи рівняння (6) після заміни змінних (7), отримуємо

$$\ln \frac{N_{C_i}}{N_{C_i(0)}} = -\frac{4\pi D_0 k}{a E_a} T^2 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \sum_m r_{C_i, m} N_m, \quad (8)$$

де $N_{C_i(0)}$ – вихідна концентрація C_i , N_{C_i} – концентрація C_i після відпалу до деякої температури T .

Далі під температурою відпалу міжвузловинного вуглецю T_a будемо розуміти таку температуру, при якій концентрація даних центрів знижується в e разів відносно початкового значення. Тоді за умови $T = T_a$ буде вірною рівність $N_{C_i} / N_{C_i(0)} = e^{-1}$, і в результаті з (8) отримаємо рівняння

$$\frac{T_a^2}{E_a} \exp\left(-\frac{E_a}{kT_a}\right) \sum_m r_{C_i, m} N_m = \frac{a}{4\pi D_0 k}. \quad (9)$$

Рівняння (9) встановлює взаємозв'язок між такими параметрами, як температура відпалу C_i , енергія активації дифузії даного центра E_a та концентрації стоків N_m з урахуванням відповідних радіусів захоплення.

Використовуючи результати ізохронного відпалу досліджуваних кристалів, було оцінено енергію активації дифузії C_i у зразках із різним вмістом олова за методикою, описаною в [25]. Оцінки показали, що при досліджуваних у роботі концентраціях олова в Si енергія активації набуває значення $E_a = (0,75 \pm 0,02)$ еВ, що незначно відрізняється від відомої енергії активації відпалу C_i в Si, яка становить 0,77 еВ [10].

Оцінюючи ефективності взаємодії міжвузловинного вуглецю з домішковими атомами Sn, враховано, що ймовірності їх захоплення такими стоками, як O_i та C_s , як було показано вище, рівні. Тоді, враховуючи концентрації домішок та визначені експериментально значення температур відпалу C_i у зразках Si:Sn з

використанням рівняння (9) і значення E_a , було отримано таке співвідношення для радіусів захоплення C_i стоками O_i , C_s та Sn :

$$r_{C_i, O_i} : r_{C_i, C_s} : r_{C_i, Sn} \approx 1 : 1 : 2,3. \quad (10)$$

Враховуючи (5), таке ж співвідношення можна записати і для відповідних ймовірностей реакцій:

$$\chi_{C_i, O_i} : \chi_{C_i, C_s} : \chi_{C_i, Sn} \approx 1 : 1 : 2,3. \quad (11)$$

Використовуючи співвідношення (11) з урахуванням вмісту домішок олова, кисню та вуглецю (див. таблицю), було оцінено концентрації комплексів C_iSn , C_iO_i та C_iC_s , які утворюються при відпалі C_i у досліджуваних зразках. Виявилось, що у зразку з мінімальним вмістом олова $N_{Sn} = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ за відповідних йому концентрацій кисню та вуглецю результуюча концентрація центрів C_iSn більше ніж у п'ять разів перевищує концентрацію комплексів C_iO_i та C_iC_s . А у зразку з максимальною концентрацією олова $N_{Sn} = 1,8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ дане співвідношення досягає вже п'ятдесяти. Ці оцінки дають можливість пояснити практичну відсутність після відпалу C_i у спектрах поглинання смуг, які відповідають комплексам C_iO_i та C_iC_s для зразків з великим вмістом олова.

4. Висновки

У роботі проведено дослідження ефективностей взаємодії міжвузловинного вуглецю з основними технологічними домішками у кремнії – киснем та вуглецем заміщення, а також з ізоелектронною домішкою – оловом. Показано, що ймовірності взаємодії міжвузловинного вуглецю з міжвузловинним киснем та вузловим вуглецем у ґратці кремнію є близькими за величиною.

Виявлено, що міжвузловинний вуглець у Si легованому оловом є менш термічно стабільним, порівняно з нелегованим кремнієм, і температура його остаточного відпалу поступово знижується при зростанні концентрації олова. Проведено кількісну оцінку ймовірностей захоплення дифундуючих атомів C_i домішковими атомами O_i , C_s та Sn . Показано, що ймовірність взаємодії C_i з оловом у $\sim 2,3$ раза вища, ніж ймовірність його взаємодії з киснем та вузловим вуглецем. Для використаних зразків проведено оцінку концентрацій комплексів C_iSn , C_iO_i та C_iC_s , які утворюються при відпалі C_i із урахуванням вмісту кисню, вуглецю та олова у вихідних зразках (див. таблицю). Оцінки показали, що для зразка з мінімальною досліджуваною концентрацією олова Si:Sn-1 ($N_{Sn} = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) концентрація центрів C_iSn у

п'ять разів вища, ніж центрів C_iO_i та C_iC_s , тоді як для зразка Si:Sn-4 ($N_{Sn} = 1,8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$) ця величина досягає п'ятдесяти.

1. A. Brelet and J. Charlemagne, in *Radiation Effects in Semiconductors*, ed. by J.W. Corbett and G.D. Watkins (Gordon and Breach, London, 1971), p. 161.
2. G.D. Watkins, Phys. Rev. B **12**, 4383 (1975).
3. G.D. Watkins and K.L. Brower, Phys. Rev. Lett. **36**, 1329 (1976).
4. A.B. Bean, R.C. Newman, and R.S. Smith, J. Phys. Chem. Solids **31**, 739 (1970).
5. J.M. Trombetta and G.D. Watkins, Appl. Phys. Lett. **51**, 1103 (1987).
6. G. Davies, A.S. Oates, R.C. Newman, R. Woolley, E.C. Lightowers, M.J. Binns, and J.L. Wilkes, J. Phys. C: Sol. State Phys. **19**, 841 (1986).
7. B.G. Svensson, J. Svensson, J.L. Lindström, G. Davies, and J.M. Corbett, Appl. Phys. Lett. **51**, 2257 (1987).
8. В.П. Маркевич, Л.И. Мурич, ФТП **22** (5), 911 (1988).
9. G. Davies, Mater. Sci. Forum **38-41**, 151 (1989).
10. L.W. Song and G.D. Watkins, Phys. Rev. B **42**, 5759 (1990).
11. G. Davies and R.C. Newman, *Handbook on Semiconductors*, ed. by T.S. Moss (Elsevier, Amsterdam, 1994) and references therein.
12. L.I. Murin, J.L. Lindström, G. Davies, and V.P. Markevich, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B **253**, 210 (2006).
13. M.T. Asom, J.L. Benton, R. Sauer, and L.C. Kimerling, Appl. Phys. Lett. **51**, 256 (1987).
14. E.V. Lavrov and M. Fanciulli, Physica B **302-303**, 263 (2001).
15. E.V. Lavrov, M. Fanciulli, M. Kaukonen, R. Jones, and P.R. Briddon, Phys. Rev. B **64**, 125212 (2001).
16. Л.И. Хируненко, О.А. Кобзарь, Ю.В. Помозов, М.Г. Соснин, Н.А. Трипачко, ФТП **37**, 304 (2003).
17. L.I. Khirunenko, O.O. Kobzar, Yu.V. Omozov, M.G. Sosnin, M.O. Tripachko, N.V. Abrosimov, and H. Riemann, Physica B **340-342**, 546 (2003).
18. L.I. Khirunenko, O.O. Kobzar, Yu.V. Pomozov, M.G. Sosnin, M.O. Tripachko, N.V. Abrosimov, and H. Riemann, Sol. State Phenom. **95-96**, 393 (2004).
19. L.I. Khirunenko, Yu.V. Pomozov, M.G. Sosnin, A. Duvanskii, V.J.B. Torres, J. Coutinho, R. Jones, P.R. Briddon, N.V. Abrosimov, and H. Riemann, Physica B: Cond. Matter, **401-402**, 200 (2007).
20. A. Baghdadadi, W.M. Bullis, M.C. Choarkin, L. Yue-zhen, R.I. Scace, R.W. Series, P. Stallhofer, and M. Watanable, J. Electrochem. Soc. **136**, 2015 (1989).

21. E.V. Lavrov, L. Hoffmann, and B. BechNielsen, Phys. Rev. B **60**, 8081 (1999).
22. L.I. Khirunenko, M.G. Sosnin, Yu.V. Pomozov, L.I. Murin, V.P. Markevich, A.R. Peaker, L.M. Almedia, J. Coutinho, and V.J.B. Torres, Phys. Rev. B **78**, 155203 (2008).
23. В.Л. Винецкий, Г.А. Холодарь, *Радиационная физика полупроводников* (Наукова Думка, Киев, 1979).
24. В.В. Емцев, Т. В. Машовец, *Примеси и точечные дефекты в полупроводниках* (Радио и связь, Москва, 1981).
25. Ж. Бургуэн, М. Лано, *Точечные дефекты в полупроводниках. Экспериментальные аспекты* (Мир, Москва, 1985).

Одержано 19.05.09

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
МЕЖУЗЕЛЬНОГО УГЛЕРОДА
С КИСЛОРОДОМ, ОЛОВОМ
И УГЛЕРОДОМ ЗАМЕЩЕНИЯ
В ОБЛУЧЕННОМ КРЕМНИИ

*М.И. Гриценко, О.О. Ковзар Ю.В. Помозов,
М.Г. Соснин, Л.И. Хируненко*

Резюме

В работе методом инфракрасной фур'е-спектроскопии проведено исследование эффективности взаимодействия междузельного углерода с основными технологическими примесями кремния – кислородом и углеродом замещения, а также с изоэлектронной примесью – оловом. Показано, что вероятности взаимодействия междузельного углерода с междузельным кислородом и узловым углеродом близки по величине. Обнаружено,

что междузельный углерод в Si, легированном оловом, имеет меньшую термическую стабильность, чем в кремнии, и температура его окончательного отжига постепенно снижается при увеличении концентрации олова. Показано, что вероятность взаимодействия междузельного углерода с оловом в $\sim 2,3$ раза превышает вероятность его взаимодействия с кислородом и узловым углеродом.

EFFICIENCY OF INTERACTION OF INTERSTITIAL
CARBON WITH OXYGEN, TIN, AND SUBSTITUTION
CARBON IN IRRADIATED SILICON

*M.I. Gritsenko¹, O.O. Kobzar¹, Yu.V. Pomozov²,
M.G. Sosnin², L.I. Khirunenko²*

¹Taras Shevchenko Chernigiv State Pedagogical University
(53, Get'mana Polubotka Str., Chernigiv, Ukraine;
e-mail: o.a.kobzar@gmail.com);

²Institute of Physics, Nat. Acad. of Sci. of Ukraine
(46, Prosp. Nauky, Kyiv 03680, Ukraine)

S u m m a r y

The infrared Fourier spectroscopy technique is used for the investigation of the efficiency of interaction of interstitial carbon with the basic technological impurities in silicon, oxygen and substitution carbon, as well as with an isoelectronic impurity, tin. It is shown that the probabilities of the interaction of interstitial carbon with interstitial oxygen and substitution carbon are close. It is found that interstitial carbon in tin-doped Si is less thermostable than that in Si, and the temperature of its complete annealing gradually decreases with increasing the tin concentration. It is shown that the probability of the interaction of interstitial carbon with tin exceeds the probability of its interaction with oxygen and on-site carbon by a factor of ~ 2.3 .