

В. Й. Сугаков, А. А. Чернюк

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

РОЗПОДІЛ КОНЦЕНТРАЦІЇ ДОМІШОК ТА ЇХНІХ КОМПЛЕКСІВ  
ІЗ ВАКАНСІЯМИ ЗА МЕЖАМИ ПРОБІГУ ІОНІВ ПРИ ІМПЛАНТАЦІЇ

Розраховано просторовий розподіл впроваджених атомів і точкових дефектів, створених опроміненням, за межами пробігу іона в кристалі з домішками. Враховано дифузний рух дефектів і домішок, захоплення їх стоками, процеси рекомбінації дефектів, утворення і розпаду комплексів. Розглянуто кристал у діапазоні температури, при якій домішки нерухомі, а комплекси домішок із вакансіями можуть переміщуватись у кристалі. Така ситуація реалізується в кремнії з домішкою кисню. Показано, що поза межами пробігу відбувається просторовий перерозподіл концентрацій вільних домішок і домішок, зв'язаних із вакансіями: певна область за кінцем пробігу іонів стає збідненою на комплекси і збагаченою вільними домішками. Область зростає зі зменшенням густини дислокацій або зі зниженням температури і може досягати розміру кількох десятків мікрометрів.

*Ключові слова:* іонне опромінення, дефекти, домішки, далекодія.

Вплив ядерного опромінення на властивості матеріалів за межами пробігу частинок при іонній імплантації є одним із важливих і не розв'язаних питань радіаційної фізики. Явище спостерігалось у багатьох роботах [1 - 10]. Явище полягає в тому, що за межами області кристала, на яку іони проникають у кристал, спостерігаються зміни фізичних властивостей кристала. Так, виникають дефекти на відстанях, що значно перевищують величину пробігу іонів [1], змінюється просторовий розподіл компонент матеріалу, зростає мікротвердість [4], спостерігаються фазові перетворення [5, 8]. У роботі [7] спостерігався максимум розподілу дефектів у кремнії, опроміненого 27,2 МеВ іонами гелію в області, далекій від пробігу іонів (останній становить 360 мкм). Для пояснення явищ залучались різноманітні моделі прискореної дифузії в полі механічних напруг, які виникають при опроміненні [2], підкреслювалась важливість процесів самоорганізації [5], утворення бризерів [9], солітонів [10]. Ці процеси впливають на глибоке проникнення іонів у кристал, їхній розгляд у більшості випадків якісний і не дає відповіді на питання про розподіл домішок і дефектів в опроміненому кристалі. У роботах [11, 12] розглянуто випадок іонної імплантації, коли імплантовані атоми створюють комплекси з вакансіями. Показано, що за межами пробігу іонів утворюється область із малою густиною вакансій і на певній відстані від границі пробігу утворюється пік густини комплексів «вакансія – імплантований атом».

У даній роботі розглядається розподіл дефектів при іонній імплантації за межами пробігу іонів за умови наявності в кристалі домішок, які можуть утворювати комплекси з вакансією. При дослідженні ми застосовуватимемо підхід, використаний у роботах [11, 12]. Імплантація створює

біля поверхні певний розподіл імплантованих атомів, вакансій і міжвузлових атомів. У подальшому динаміку руху таких квазічастинок описуватимемо рівняннями дифузії.

Розглянемо кристал, що містить домішки, які можуть утворювати комплекси з вакансіями з енергією зв'язку, більшою за енергію зв'язку імплантованого атома з вакансією. Крім того, припускаємо, що комплекси «вакансія – домішки» є мобільними, а коефіцієнт дифузії домішкових атомів є малим. Така система реалізується, наприклад, у кремнії з домішкою кисню, який може утворювати комплекси з вакансіями (так звані А-центри). Уведені радіацією в кристал радіаційні дефекти приводять до перерозподілу співвідношення концентрації вільних домішок і домішок, зв'язаних у комплекси, що внаслідок процесів дифузії приводить до перерозподілу їх у просторі. Основні рівняння, що описують розподіл дефектів, домішок та імплантованих атомів, такі:

$$\frac{\partial n_v}{\partial t} = D_v \frac{\partial^2 n_v}{\partial z^2} - W_{v,i;0} n_v n_i - W_{v,p;vp} (n_v n_p - v_{vp}^{v,p} n_{vp}) - W_{v,s;vs} (n_v n_s - v_{vs}^{v,s} n_{vs}) - W_{vd} (n_v - n_v^{th}) + K_v, \quad (1)$$

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} = D_i \frac{\partial^2 n_i}{\partial z^2} - W_{v,i;0} n_v n_i - W_{vp,i;p} n_{vp} n_i - W_{vs,i;s} n_{vs} n_i - W_{id} n_i + K_i, \quad (2)$$

$$\frac{\partial n_p}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 n_p}{\partial z^2} - W_{v,p;vp} (n_v n_p - v_{vp}^{v,p} n_{vp}) + W_{vp,i;p} n_{vp} n_i - W_{pd} n_i + K_p, \quad (3)$$

$$\frac{\partial n_s}{\partial t} = D_s \frac{\partial^2 n_s}{\partial z^2} + W_{v,s;vs} (n_v n_s - v_{vs}^{v,s} n_{vs}) - W_{vs,i;s} n_{vs} n_i, \quad (4)$$

© В. Й. Сугаков, А. А. Чернюк, 2017

$$\frac{\partial n_{vp}}{\partial t} = W_{v,p;vp} (n_v n_p - v_{vp}^{v,p} n_{vp}) - W_{vp,i;p} n_{vp} n_i, \quad (5)$$

$$\frac{\partial n_{vs}}{\partial t} = D_{vs} \frac{\partial^2 n_{vs}}{\partial z^2} + W_{v,s;vs} (n_v n_s - v_{vs}^{v,s} n_{vs}) - W_{vs,i;s} n_{vs} n_i, \quad (6)$$

де  $n_i$ ,  $n_v$ ,  $n_s$ ,  $n_p$ ,  $n_{vp}$ ,  $n_{vs}$  – концентрації міжвузлових атомів, вакансій, домішок, імплантованих атомів, комплексів «імплантований атом – вакансія» та «домішка – вакансія» відповідно. Величина  $D_{s(i,v,vs,vp)} = D_{os(i,v,vs,vp)} \exp(-E_{s(i,v,vs,vp)} / \kappa T)$  позначає швидкість дифузії таких квазічастинок. За одиницю довжини в рівняннях (1) - (6) обрано період ґратки  $a = 3 \cdot 10^{-8}$  см. Концентрація є безрозмірною і задається числом дефектів на об'єм комірки. Коефіцієнти  $v_{vs}^{v,s}$  визначаються відношенням прямого й оберненого процесу при утворенні комплексів. Із принципу детальної рівноваги випливає, що ця величина має порядок  $v_{vs}^{v,s} \approx \exp(-E_{sv} / \kappa T)$ , де  $E_{sv}$  є енергією утворення комплексу. Величина  $W_{i;j}$  позначає ймовірність переходу із стану  $i$  в стан  $j$ . Наприклад,  $W_{v,s;vs}$  описує перехід зі стану вільної вакансії та домішки в стан комплексу «вакансія – домішка». Величини  $W_{p(i,v)d}$  описують захоплення імплантованого атома (міжвузлового атома, вакансії) дислокацією. Імовірності переходів можуть бути виражені через коефіцієнти дифузії й ефективні радіуси взаємодії дефектів [11, 12].

Величини  $K_p$ ,  $K_v$  і  $K_i$  визначають швидкості введення імплантованих атомів, вакансій і міжвузлових атомів відповідно. При стаціонарному зовнішньому опроміненні ці величини практично не залежать від часу і можуть використовуватись для опису процесів як в області пробігу, так і в області поза пробігом. Значення числа квазічастинок, створених в одиницю часу, та їхній початковий розподіл отримані за допомогою програми TRIM.  $K_i$  і  $K_v$  вважатимемо пропорційними швидкості введення імплантованих атомів  $K_p$  у точці  $z$  на одиницю довжини  $K_{i(v)} = q_{i(v)} K_p(z)$  і будемо апроксимувати гауссовим розподілом

$$K_p(z) = I_p \left( \frac{1}{2\pi} \right)^{1/2} \frac{1}{l} \exp \left( - \frac{(z - z_p)^2}{2l^2} \right), \quad (7)$$

де  $I_p$  – густина падаючого потоку іонів,  $z_p$ ,  $l$  – положення максимуму та ширини розподілу потоку. Густина падаючого потоку визначається потоком через переріз комірки і при обраній одиниці довжини має розмірність оберненого часу.

Рівняння (1) - (6) розв'язувались чисельно з такими граничними та початковими умовами:

$$n_p(z, 0) = 0, \quad n_i(z, 0) = 0, \quad n_v(z, 0) = n_v^{th}, \quad (8)$$

$$n_p(0, t) = 0, \quad n_i(0, t) = 0, \quad n_v(0, t) = n_v^{th}, \quad (9)$$

$$n_p(\infty, t) = 0, \quad n_i(\infty, t) = 0, \quad n_v(\infty, t) = n_v^{th}. \quad (10)$$

Вважалось, що між концентрацією вакансій і комплексами «вакансія – домішка» в початковому стані існує термодинамічна рівновага.

Система рівнянь (1) - (6) з граничними умовами (8) - (10) описує систему як в області пробігу, так і поза нею. Проте в області кінця пробігу мають місце нелінійні процеси, пов'язані з накопиченням імплантованих атомів, локалізованих на вакансіях, складних комплексів імплантованих атомів, комплексів вакансій, міжвузлових атомів, домішок тощо. Ці процеси не відображені в рівняннях (1) - (6) і рівняння їх не описують. Тому цю область розв'язків системи (1) - (6) ми досліджувати не будемо. Ця область добре вивчена у зв'язку з широким застосуванням явища імплантації. Ми будемо досліджувати область поза пробігом, вважаючи, що процеси утворення складних дефектів в області кінця пробігу іонів мало впливають на утворення дефектів опроміненням в кінці пробігу, тобто на величини  $K_p$ ,  $K_i$  і  $K_v$ . Саме ці величини і є джерелом розподілу дефектів поза пробігом.

Розглянемо випадок, коли температура є такою, що домішки є нерухомими, а комплекс домішки з вакансією є рухомим дефектом. Радіаційні вакансії утворюють із вільними нерухомими домішками комплекси, які стають рухомими. У системі існує градієнт концентрацій дефектів, які рухаються від області кінця пробігу. Утворення комплексів і різний характер їхнього руху приводить до перерозподілу дефектів у просторі.

Розглянемо приклад домішки кисню у кремнії, коли при відсутності опромінення концентрації вільних домішок і комплексів збігаються  $n_s = n_{vs} = 5 \cdot 10^{-6}$ . Результати для просторового розподілу концентрацій вільних домішок і концентрацій комплексів домішок із вакансіями представлено на рис. 1 і 2 в безрозмірних одиницях.

Розрахунки системи рівнянь (1) - (6) виконані при таких параметрах  $D_s = 0,13 \exp(-2,53\epsilon)$  [13],  $D_i = 3,04 \exp(-0,77\epsilon)$  [14],  $D_{vs} = 6 \exp(-1,8\epsilon)$  [15],  $D_p = 1,28 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-1,8\epsilon)$  [16],

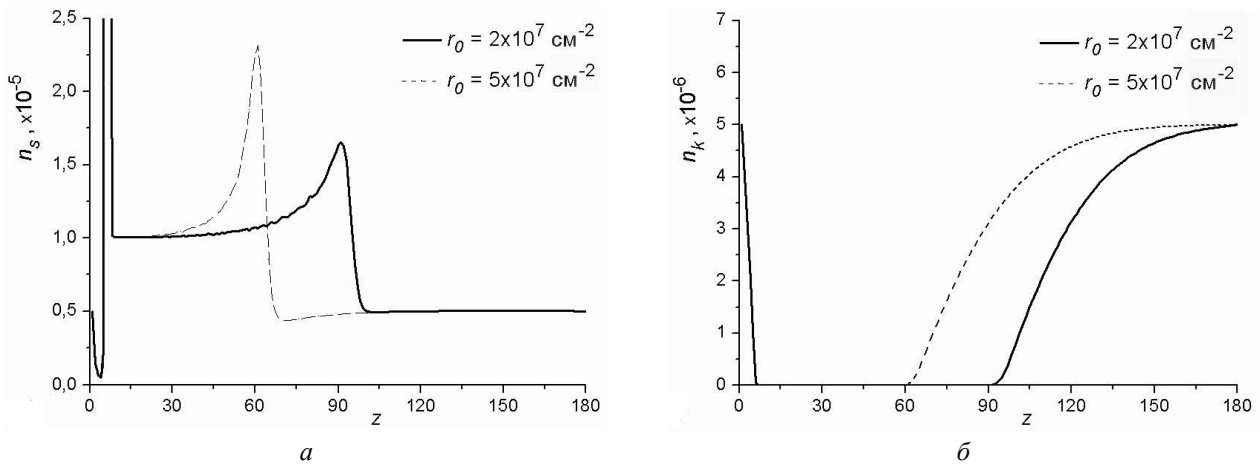


Рис. 1. Просторовий розподіл концентрацій домішки  $n_s$  (а) та комплексів домішки з вакансією  $n_k$  (б) для різних густин дислокацій  $r_0$  при температурі 650 К.  $E_f = 2$  еВ.

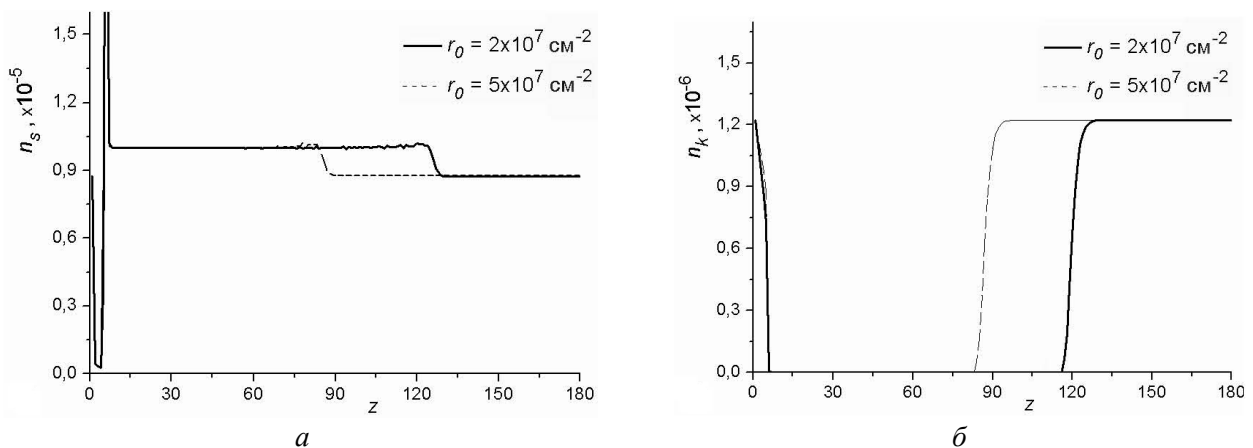


Рис. 2. Просторовий розподіл концентрацій домішки  $n_s$  (а) та комплексів домішки з вакансією  $n_k$  (б) для різних густин дислокацій  $r_0$  при температурі 590 К.  $E_f = 2,1$  еВ.

$D_v = 0,01 \exp(-0,4\epsilon)$  [17] (позначено  $\epsilon = eV / kT$ , усі коефіцієнти дифузії вимірюються в  $\text{см}^2/\text{с}$ ),  $E_{sv} = (1,8)eV$  [18] і при параметрах опромінення  $I_p = 0,0001 \cdot \text{с}^{-1}$ ,  $q_i = q_v = 100$ ,  $z_p = 0,4$  мкм,  $l = 0,1$  мкм.

Через деякий час після початку опромінення в системі формується квазістаціонарний стан, в якому розподіл домішок та їхніх комплексів із вакансіями залишається незмінним у часі, зростає лише кількість імпантованих атомів на вакансіях, що обумовлено накопиченням імпантованих атомів у кристалі внаслідок імпантації. Час, необхідний для встановлення квазірівноважного стану, різко збільшується із пониженням температури. Із рис. 1 і 2 видно, що в області кінця пробігу існує високий пік концентрацій дефектів. Як ми вже обговорювали, у цій області ефекти від імпантації є максимальними і мають місце процеси утворення складних комплексів, що у використаних рівняннях не відображено. Тому ця область нами не досліджувалась.

Особливості розподілу дефектів поза областю

пробігу такі (див. рис. 1 і 2). У деякій області за межею пробігу концентрація вільних домішок на великій відстані збільшена в порівнянні з концентрацією в кристалі (при деяких параметрах з'являється пік концентрації домішок), а концентрація комплексів «домішка – вакансія» ( $A$ -центрів) є надзвичайно малою. При розглядуваних параметрах ця область досягає значень кількох десятків мікрометрів, що значно перевищує типове значення області пробігу іонів при імпантації іонів з енергією, яка не перевищує кількох сотень кілоелектронвольт. Область зростає зі зменшенням густини дислокацій і зі зниженням температури.

При певних значеннях параметрів на деякій відстані від області кінця пробігу, що значно перевищує величину пробігу, існує пік у розподілі вільних домішок (див. рис. 2).

Таким чином, у роботі показано можливість істотного перерозподілу при імпантації концентрацій домішок і комплексів «домішка – вакансія». Це повинно приводити до зміни електрофізичних властивостей у макроскопічній області кристала.

Характер розподілу дефектів і домішок залежить від параметрів системи (дані про формування вакансій, коефіцієнт дифузії вакансій та ряд інших параметрів). На жаль, у різних авторів ці дані не збігаються. Так, для енергії формування вакансії з експерименту отримані різні значення:  $(2,8 \pm 0,3)$  еВ,  $(2,4 \pm 0,15)$  еВ,  $(2,1 \pm 0,7)$  еВ у роботах [19 - 21] відповідно. Така різниця зна-

чень не дає можливості однозначного визначення розподілу домішок і комплексів. Проте якісна картина про появу максимумів у розподілі та перерозподіл комплексів поблизу поверхні кристала, а також тенденція поведінки картини зі зміною температури, густини дислокацій повинна залишатись.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Павлов П.В., Пашкин В.И., Генкин В.М. и др. Изменение дислокационной структуры кремния при облучении ионами средних энергий // ФТТ. - 1973. - Т. 15, вып. 9. - С. 2857 - 2859.
2. Скупов В.Д., Тетельбаум Д.И., Шунгуров Г.В. Влияние протяжённых дефектов в исходных кристаллах на эффект дальнего действия при ионной имплантации // Письма в ЖТФ. - 1989. - Т. 15, вып. 22. - С. 44 - 47.
3. Быков В.Н., Малышкин В.Г., Хмелевская В.С. Эффект дальнего действия при ионном облучении // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. - 1989. - Вып. 3 (50). - С.45 - 52.
4. Пивоваров А.Л. Эффект дальнего действия при облучении металлов ионно-плазменными потоками // Металлофизика и новейшие технологии. - 1994. - Т. 16, № 12. - С. 3 - 17.
5. Хмелевская В.С., Малышкин В.Г., Соловьев С.П. и др. Эффект дальнего действия в условиях радиационно-индуцированного кинетического фазового перехода // Письма в ЖТФ. - 1996. - Т. 22, вып. 5. - С. 9 - 13.
6. Алашкин А.С., Крылов П.Н., Шинкевич М.В. Эффект дальнего действия в полупроводниках // Вестник Удмуртского ун-та. - 2005. - Вып. 1. - С. 141 - 152.
7. Гроза А.А., Литовченко П.Г., Старчик М.И. Ефекти радіації в інфрачервоному поглинанні та структурі кремнію. - Київ: Наук. думка, 2006. - 124 с.
8. Овчинников В.В. Радиационно-динамические эффекты. Возможности формирования уникальных структурных состояний и свойств конденсированных сред // УФН. - 2008. - Т. 178, вып. 9. - С. 993 - 1001.
9. Li Zhang, Guangze Tang, Xinxin Ma. Long range effect of ion irradiation on diffusion // Physics Letters A. - 2010. - Vol. 374(21). - P. 2137 - 2139.
10. Groza A.A., Venger E.F., Varnina V.I. et al. Influence of neutron irradiation on electrooptical and structural properties of silicon // Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics. - 2001. - Vol. 4, No. 3. - P. 152 - 155.
11. Сугаков В.И. Особенности формирования распределения плотности имплантированных в кристалл атомов за границей пробега // Ядерная физика та енергетика. - 2009. - Т. 10, № 4. - С. 395 - 402.
12. Сугаков В.И. Образование переходов междоузельные атомы-вакансии при имплантации ионов в кристалл // ФТТ. - 2011. - Т. 53, № 10. - С. 2023 - 2031.
13. Newman R.C. Oxygen diffusion and precipitation in Czochralski silicon // J. Phys.: Condens. Matter. - 2000. - Vol. 12. - P. 335 - 365.
14. Marqués L.A., Pelaz L., Castrillo P. et al. Molecular dynamics study of the configurational and energetic properties of the silicon self-interstitial // Phys. Rev. B. - 2005. - Vol. 71. - P. 085204.
15. Pellegrino P., Leveque P., Lavita J. et al. Annealing kinetics of vacancy-related defects in low-dose MeV self-ion-implanted n-type silicon // Phys. Rev. B. - 2001. - Vol. 64. - P. 195211.
16. Kaplan D.R., Weigel C., Corbett J.W. Calculations on the properties of helium in silicon // Physica status solidi (b). - 1979. - Vol. 94. - P. 359.
17. Shimiso Y., Uematsu M., Itoh K.M. Experimental evidence of the vacancy-mediated silicon self-diffusion in single-crystalline silicon // Phys. Rev. Lett. - 2007. - Vol. 98. - P. 095901.
18. Casali R.A., Rucker H., Methfessel M. Interaction of vacancies with interstitial oxygen in silicon // Appl. Phys. Lett. - 2001. - Vol. 78. - P. 913 - 915.
19. Ranki V., Saarinen K. Formation of thermal vacancies in highly As and P doped Si // Phys. Rev. Lett. - 2004. - Vol. 93. - P. 255502.
20. Lerner L., Stolwijk N.A. Vacancy concentrations in silicon determined by the indiffusion of iridium // Appl. Phys. Lett. - 2005. - Vol. 86. - P. 011901.
21. Bracht H., Pedersen J.F., Zangenberg N. et al. Radiation enhanced silicon self-diffusion and the silicon vacancy at high temperatures // Phys. Rev. Lett. - 2003. - Vol. 91. - P. 245502.

В. И. Сугаков, А. А. Чернюк

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ПРИМЕСЕЙ И ИХ КОМПЛЕКСОВ  
С ВАКАНСИЯМИ ЗА ПРЕДЕЛАМИ ПРОБЕГА ИОНОВ ПРИ ИМПЛАНТАЦИИ**

Рассчитано пространственное распределение внедренных атомов и точечных дефектов, созданных облучением, за пределами пробега иона в кристалле с примесями. Учтено диффузное движение дефектов и примесей, захвата их стоками, процессы рекомбинации дефектов, образования и распада комплексов. Рассмотрен кри-

сталл в диапазоне температуры, для которой примеси неподвижны, а комплексы примесей с вакансиями могут перемещаться в кристалле. Такая ситуация реализуется в кремнии с примесью кислорода. Показано, что за пределами пробега происходит пространственное перераспределение концентраций свободных примесей и примесей, связанных с вакансиями: определенная область за концом пробега ионов становится обедненной на комплексы и обогащенной свободными примесями. Размер области возрастает с уменьшением плотности дислокаций или с понижением температуры и может достигать размера нескольких десятков микрометров.

*Ключевые слова:* ионное облучение, дефекты, примеси, дальное действие.

**V. I. Sugakov, A. A. Chernyuk**

*Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv*

## DISTRIBUTION OF CONCENTRATION OF IMPURITIES AND “IMPURITY–VACANCY” COMPLEXES BEYOND THE RANGE OF IONS DURING IMPLANTATION

Spatial distribution of implanted atoms and point defects created by irradiation is calculated beyond the range of ions in the crystal with impurities. Diffuse movement of defects and impurities, their capture by their effluents, the processes of recombination defects, formation and decay of complexes are taken into account. The crystal is considered at the temperature when impurities are still and impurity complexes with vacancies can move in the crystal. This situation is realized in silicon mixed with the oxygen. It is shown that the spatial redistribution of the concentrations of free impurities and impurities connected with vacancies is taking place beyond the range of ions: certain region at the end of ion range becomes impoverished in complexes and enriched in free impurities. This region increases with lowering the dislocations density or with decreasing temperature and can reach the size of several tens of micrometers.

*Keywords:* ion irradiation, defects, impurities, long-range.

### REFERENCES

1. Pavlov P.V., Pashkin V.I., Genkin V.M. et al. // FTT. - 1973. - Vol. 15, Iss. 9. - P. 2857 - 2859. (Rus)
2. Skupov V.D., Tetel'baum D.I., Shungurov G.V. // Pis'ma v ZhTF. - 1989. - Vol. 15, Iss. 22. - P. 44 - 47. (Rus)
3. Bykov V.N., Malynkin V.G., Khmelevskaya V.S. // Voprosy atomnoj nauki i tekhniki. Ser.: Fizika radiatsionnykh povrezhdenij i radiatsionnoe materialovedenie. - 1989. - Iss. 3 (50). - P.45 - 52. (Rus)
4. Pivovarov A.L. // Metallofizika i novejsie tehnologii. - 1994. - Vol. 16, No. 12. - P. 3 - 17. (Rus)
5. Khmelevskaya V.S., Malynkin V.G., Solov'ev S.P. et al. // Pis'ma v ZhTF. - 1996. - Vol. 22, Iss. 5. - P. 9 - 13. (Rus)
6. Alalykin A.S., Krylov P.N., Shinkevich M.V. // Vestnik Udmurtskogo universiteta. - 2005. - Iss. 1. - P. 141 - 152. (Rus)
7. Groza A.A., Lytovchenko P.G., Starchyk M.I. Effects of radiation in the infrared absorption and silicon structure. - Kyiv: Naukova dumka, 2006. - 124 p. (Ukr)
8. Ovchinnikov V.V. // UFN. - 2008. - Vol. 178, Iss. 9. - P. 993 - 1001. (Rus)
9. Li Zhang, Guangze Tang, Xinxin Ma. Long range effect of ion irradiation on diffusion // Physics Letters A. - 2010. - Vol. 374(21). - P. 2137 - 2139.
10. Groza A.A., Venger E.F., Varnina V.I. et al. Influence of neutron irradiation on electrooptical and structural properties of silicon // Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics. - 2001. - Vol. 4, No. 3. - P. 152 - 155.
11. Sugakov V.I. // Yaderna fizyka ta energetyka (Nucl. Phys. At. Energy). - 2009. - Vol. 10, No. 4. - P. 395 - 402. (Rus)
12. Sugakov V.I. // FTT. - 2011. - Vol. 53, No. 10. - P. 2023 - 2031. (Rus)
13. Newman R.C. Oxygen diffusion and precipitation in Czochralski silicon // J. Phys.: Condens. Matter. - 2000. - Vol. 12. - P. 335 - 365.
14. Marqués L.A., Pelaz L., Castrillo P. et al. Molecular dynamics study of the configurational and energetic properties of the silicon self-interstitial // Phys. Rev. B. - 2005. - Vol. 71. - P. 085204.
15. Pellegrino P., Leveque P., Lavita J. et al. Annealing kinetics of vacancy-related defects in low-dose MeV self-ion-implanted n-type silicon // Phys. Rev. B. - 2001. - Vol. 64. - P. 195211.
16. Kaplan D.R., Weigel C., Corbett J.W. Calculations on the properties of helium in silicon // Physica status solidi (b). - 1979. - Vol. 94. - P. 359.
17. Shimiso Y., Uematsu M., Itoh K.M. Experimental evidence of the vacancy-mediated silicon self-diffusion in single-crystalline silicon // Phys. Rev. Lett. - 2007. - Vol. 98. - P. 095901.
18. Casali R.A., Rucker H., Methfessel M. Interaction of vacancies with interstitial oxygen in silicon // Appl. Phys. Lett. - 2001. - Vol. 78. - P. 913 - 915.
19. Ranki V., Saarinen K. Formation of thermal vacancies in highly As and P doped Si // Phys. Rev. Lett. - 2004. - Vol. 93. - P. 255502.
20. Lerner L., Stolwijk N.A. Vacancy concentrations in silicon determined by the indiffusion of iridium // Appl. Phys. Lett. - 2005. - Vol. 86. - P. 011901.
21. Bracht H., Pedersen J.F., Zangenberg N. et al. Radiation enhanced silicon self-diffusion and the silicon vacancy at high temperatures // Phys. Rev. Lett. - 2003. - Vol. 91. - P. 245502.

Надійшла 27.03.2017

Received 27.03.2017