

ISSN 1561-8323 (Print)
ISSN 2524-2431 (Online)

ФИЗИКА
PHYSICS

УДК 621.315.592
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-5-540-545>

Поступило в редакцию 14.05.2018
Received 14.05.2018

**Член-корреспондент Ф. П. Коршунов¹, С. Б. Ластовский¹,
А. С. Якушевич¹, В. П. Маркевич², Л. И. Мурин¹**

¹Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению, Минск,
Республика Беларусь

²Университет г. Манчестер, Великобритания

**ВЛИЯНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ УРОВНЯ ФЕРМИ
НА ОТЖИГ ДЕФЕКТА МЕЖУЗЕЛЬНЫЙ АТОМ УГЛЕРОДА В КРЕМНИИ**

Аннотация. Методом DLTS изучено влияние зарядового состояния межузельного углерода (C_i) на кинетику его отжига в облученных быстрыми электронами и α -частицами n^+p -структурах, изготовленных на кристаллах кремния, легированных бором ($N_B = 5 \cdot 10^{13}$ и $2,5 \cdot 10^{15}$ см⁻³). Отжиги проводились как с приложением обратного смещения, так и без смещения. Показано, что в положительном зарядовом состоянии дефекта энергия активации отжига составляет $\Delta E = 0,88$ эВ, а в нейтральном зарядовом состоянии $\Delta E = 0,73$ эВ. Отличаются и значения частотных факторов, даже при одной и той же концентрации стоков для C_i .

Ключевые слова: кремний, облучение, дефекты, отжиг, межузельные атомы углерода, зарядовое состояние

Для цитирования. Влияние положения уровня Ферми на отжиг дефекта межузельный атом углерода в кремнии / Ф. П. Коршунов [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 5. – С. 540–545. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-5-540-545>

**Fedor P. Korshunov¹, Stanislav B. Lastovskii¹, Hanna S. Yakushevich¹,
Vladimir P. Markevich², Leonid I. Murin¹**

¹Scientific-Practical Materials Research Centre of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

²Manchester University, Manchester, United Kingdom

**EFFECT OF THE FERMI LEVEL POSITION ON THE ANNEALING CHARACTERISTIC
OF INTERSTITIAL CARBON DEFECT IN SILICON**

Abstract. We present experimental results showing that the migration ability of interstitial carbon atom (C_i) in silicon depends noticeably on its charge state. The experimental results were obtained from the analysis of deep level transient spectra in n^+p diodes subjected to irradiation with 4–6 MeV electrons or α -particles at $T < 273$ K and subsequent heat-treatments in the temperature range 280–330 K under reverse bias and without it. It has been found that in the positive charge state the C_i migration energy is 0.88 ± 0.02 eV, while in the neutral charge state it is lowered down to 0.73–0.74 eV.

Keywords: silicon, irradiation, defects, annealing, interstitial carbon, charge state

For citation: Korshunov F. P., Lastovskii S. B., Yakushevich H. S., Markevich V. P., Murin L. I. Effect of the Fermi level position on the annealing characteristic of interstitial carbon defect in silicon. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 5, pp. 540–545 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-5-540-545>

Введение. Кремний продолжает оставаться базовым материалом современной микро- и наноэлектроники. Одной из наиболее важных технологических примесей (после основных легирующих и кислорода) в кремнии является углерод. В исходных промышленных кристаллах Si атомы углерода, как правило, присутствуют в заметных концентрациях и занимают электрически неактивные узловые (C_s) положения. Хорошо известно, что атомы C_s являются эффективными

ловушками собственных межузельных атомов кремния, возникающих при облучении кристаллов Si высокоэнергетическими частицами. Межузельные атомы углерода (C_i), образующиеся по механизму Уоткинса, являются одними из основных вторичных радиационных дефектов межузельного типа в облученных кристаллах кремния и кремниевых приборах [1; 2]. Электронные и оптические характеристики C_i изучены достаточно полно [1]. Впервые данный дефект был обнаружен методом ИК поглощения (полосы поглощения у 921 и 930 см^{-1}) [3]. Дальнейшая идентификация была проведена методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) (спектры Si-G12 и Si-L6) [4; 5]. C_i наблюдается также в спектрах фотолюминесценции (линия у 856 мэВ) [6; 7]. В запрещенной зоне Si межузельному углероду соответствуют глубокие уровни акцепторного типа $E_C - 0,12$ эВ и донорного $-E_V + (0,27-0,29)$ эВ. Идентификация уровней была проведена методом DLTS [5; 8; 9], а также в результате анализа данных эффекта Холла [10; 11].

Механизм отжига C_i установлен достаточно надежно. Дефект становится подвижным в области комнатных температур. Мигрируя по кристаллу кремния, C_i взаимодействует с различными примесями и дефектами, в том числе с межузельным кислородом (O_i), углеродом в узле (C_s), атомами донорных примесей (фосфором, сурьмой), оловом и т. д., с последующим образованием стабильных комплексов различного типа (C_iO_i , C_iC_s , C_iP_s , C_iSb_s , C_iSn и т. п.) [1; 12]. Энергия активации отжига C_i , по данным различных авторов, находится в пределах $0,8 \pm 0,1$ эВ. В то же время в литературе нет единого мнения о том, зависят ли характеристики отжига C_i от зарядового состояния дефекта. В частности, еще в [4] методом ЭПР было установлено, что энергия активации переориентации C_i в положительно заряженном состоянии составляет 0,88 эВ. При этом отмечалось, что переориентация C_i должна приводить к миграции дефекта в решетке Si. В то же время в ряде работ [2; 5; 11–13], в которых исследовался отжиг межузельных атомов углерода в нейтральном зарядовом состоянии, была получена энергия активации отжига в интервале значений 0,70–0,77 эВ. Тем не менее, авторами [5; 6; 14] на основании анализа данных, полученных для некоторого типа образцов p -Si, был сделан недостаточно обоснованный и, как будет показано в настоящей работе, ошибочный вывод о том, что характеристики отжига C_i не зависят от зарядового состояния дефекта. Детальные исследования, проведенные нами методом DLTS, однозначно свидетельствуют о том, что константа скорости отжига межузельных атомов углерода в кремнии p -типа существенно зависит от положения уровня Ферми (зарядового состояния C_i).

Материалы и методы исследований. Исследовались диодные n^+p -структуры двух типов. Структуры первого типа были изготовлены на пластине кремния КДБ-5, выращенного методом Чохральского, с уровнем легирования бором $[B_s] = 2,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и исходным содержанием кислорода $[O_i] = 7,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. P - n -переход формировался диффузией фосфора в p -базу при 1000 °С по стандартной технологии. Глубина залегания p - n -перехода составляла 2–3 мкм, площадь $2,1 \times 2,1 \text{ мм}^2$. Образцы второго типа изготавливались аналогичным методом на эпитаксиальном p -Si с $N_B = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. В качестве омических контактов напылялся алюминий.

Образцы первого типа облучались электронами на линейном ускорителе ЭЛУ-4 (номинальная энергия электронов $E_e = 4$ МэВ) флюенсом $\Phi = 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ при плотности потока электронов, равной $10^{12} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$. Температура облучения не превышала 275 К, для чего образцы помещались в специальный контейнер со льдом. Образцы второго типа облучались α -частицами с помощью источника с изотопами Pu^{239} (энергия α -частиц соответствовала 5,144 и 5,157 МэВ) в течение 30 мин. Поверхностная активность источника была около $2 \cdot 10^8 \text{ Бк/см}^2$. Температура образцов в процессе облучения не превышала 260 К.

Концентрация и электронные характеристики радиационных дефектов (энергия активации эмиссии и сечение захвата носителей заряда) в базовой p -области облученных диодных n^+p -структур определялись методом нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней (Deep Level Transient Spectroscopy – DLTS). Спектры DLTS измерялись в режиме заполнения ловушек основными носителями заряда при напряжениях смещения $U_{\text{см}} = -5$ В и заполнения $U_{\text{зап}} = -0,5$ В, длительности импульса заполнения – 0,01 с и окне скоростей эмиссии – 19 с^{-1} . Термический отжиг облученных образцов в интервале температур 280–330 К проводился в криостате DLTS-спектрометра без приложения обратного смещения и при $U_{\text{обр}} = -20$ В. По нашим оценкам (рис. 1), в первом случае атомы C_i для структур на основе КДБ-5 находились преимущественно

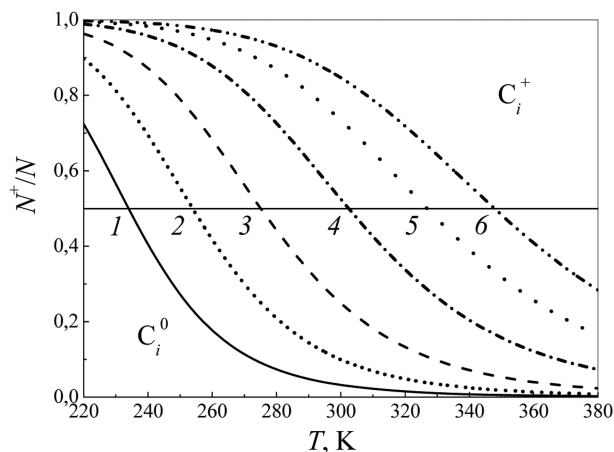


Рис. 1. Температурные зависимости функции заполнения донорного уровня $E(0/+)$ C_i дырками в кристаллах p -Si с разным уровнем легирования (детали расчета см. в тексте) p (cm^{-3}): 1 – $3 \cdot 10^{13}$; 2 – $1 \cdot 10^{14}$; 3 – $3 \cdot 10^{14}$; 4 – $1 \cdot 10^{15}$; 5 – $2,5 \cdot 10^{15}$; 6 – $5 \cdot 10^{15}$

Fig. 1. Temperature dependencies of function of occupancy with holes for the donor level $E(0/+)$ of C_i in p -type Si crystals with different doping levels (details of calculations are in the text) p (cm^{-3}): 1 – $3 \cdot 10^{13}$; 2 – $1 \cdot 10^{14}$; 3 – $3 \cdot 10^{14}$; 4 – $1 \cdot 10^{15}$; 5 – $2,5 \cdot 10^{15}$; 6 – $5 \cdot 10^{15}$

в положительном зарядовом состоянии, во втором (при приложении $U_{\text{обр}} = -20$ В) – в нейтральном, независимо от уровня легирования p -базы. Долю неотожженных межузельных атомов углерода определяли отношением амплитуды S пика C_i в спектре DLTS, измеренном после отжига, к амплитуде S_0 до отжига [2].

Результаты и их обсуждение. В зависимости от степени легирования кристаллов кремния p -типа уровень Ферми в области комнатных температур, когда имеет место отжиг C_i , может располагаться как выше, так и ниже донорного уровня C_i , т. е. в интервале $(E_V + 0,20)$ – $(E_V + 0,35)$ эВ и дефект может находиться как в нейтральном, так и положительно заряженном состояниях. Соответственно, изменение концентрации C_i в процессе термического отжига в кремнии p -типа, и в случае, когда кинетика отжига хорошо описывается моноэкспоненциальной зависимостью, может быть представлено в виде

$$[C_i] = [C_{i0}] \exp(-t / \tau),$$

где $[C_{i0}]$ – исходная (до отжига) концентрация межузельных атомов углерода; τ – характеристическое время отжига C_i , которое в случае доминирования одной и той же основной ловушки (стока) для дефекта в различных зарядовых состояниях имеет вид

$$\tau^{-1} = k_{\text{ef}} N_t,$$

где N_t – концентрация ловушки, а k_{ef} – эффективная константа скорости реакции, которая может быть записана как

$$k_{\text{ef}} = 4\pi \{ r^0 D(C_i^0) + r^+ D(C_i^+) \},$$

где r^0 и r^+ – радиусы захвата подвижных межузельных атомов углерода в нейтральном и положительно заряженных состояниях ловушкой (в нашем случае кислородом), $D(C_i^0)$ и $D(C_i^+)$ – коэффициенты диффузии этих атомов соответственно.

На рис. 1 приведены рассчитанные температурные зависимости функции заполнения донорного уровня $E(0/+)$ C_i дырками в кристаллах p -Si с разной концентрацией свободных дырок ($p = 3 \cdot 10^{13}$ – $5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$). Использовалась функция заполнения данного уровня, приведенная в [5]: $N^+ / N = 1 / \{ 1 + 0,5 \exp[(-0,27(\text{эВ}) / kT] N_V / p \}$. Данные по температурной зависимости эффективной плотности состояний в валентной зоне $N_V = 8,1 \cdot 10^{14} \cdot T^{1,85} \text{ cm}^{-3}$ были взяты из [15].

Из приведенных данных следует, что только в образцах первого типа с $[B_s] = 2,5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ основная часть атомов C_i положительно заряжена в области температур 260–330 К. Следовательно, в базовой p -области этих n^+p -структур можно изменить зарядовое состояние C_i (перевести в нейтральное состояние) путем приложения обратного смещения $U_{\text{см}}$ в процессе термического отжига.

На рис. 2, а показаны изменения неотожженной доли дефектов C_i в облученных электронами Si n^+p -диодах ($[B_s] = 2,5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) в процессе их 15-минутного изохронного отжига при различных значениях обратного смещения. Анализ DLTS спектров показывает, что независимо от величины обратного смещения в процессе отжига практически все подвижные атомы C_i захватываются межузельными атомами кислорода O_i с образованием комплекса C_iO_i . Однако скорость отжига заметно выше в образцах, отжигаемых под обратным смещением, т. е. когда дефект C_i

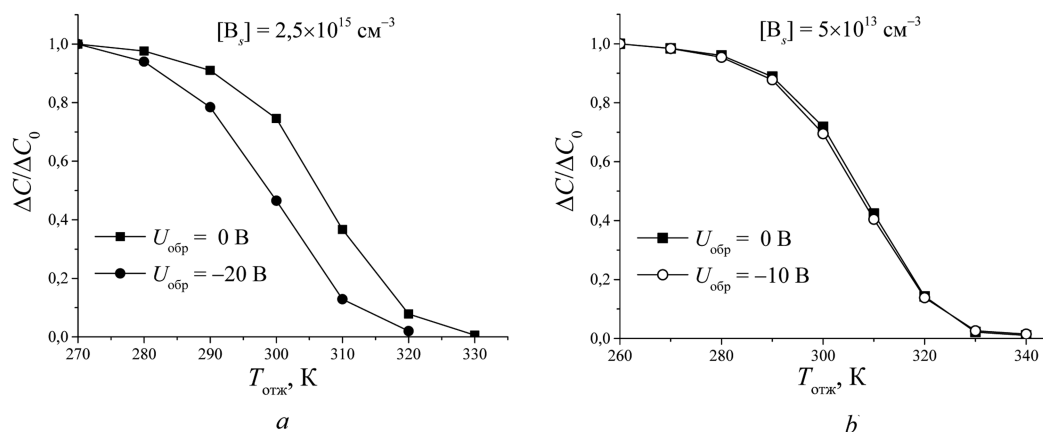


Рис. 2. Относительное изменение амплитуд DLTS-пиков ловушки C_i в результате изохронного (15 мин) отжига при различных значениях обратного смещения в (а) облученных электронами n^+ - p -структурах на p -Si с $[B_s] = 2,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и (б) облученных α -частицами n^+ - p -структурах на p -Si с $[B_s] = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$

Fig. 2. Changes in normalized magnitude of DLTS peak due to the C_i trap upon 15-min isochronal annealing with various values of reverse bias in (a) n^+ - p -structures with $[B_s] = 2.5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ irradiated with electrons and (b) n^+ - p -structures with $[B_s] = 5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ irradiated with α -particles

находится в нейтральном зарядовом состоянии. В то же время при $U_{см} = 0 \text{ В}$ основная часть дефектов положительно заряжена в исследуемом интервале температур отжига.

На рис. 2, б показаны изменения неотожженной доли дефектов C_i в облученных α -частицами Si n^+ - p -структурах с меньшим содержанием бора ($[B_s] = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$) в процессе 15-минутного изохронного отжига при различных значениях обратного смещения. Для этих образцов скорость отжига C_i практически не зависит от величины прикладываемого смещения. Следует отметить, что в обоих режимах отжига основное зарядовое состояние C_i в исследуемом интервале температур является нейтральным.

Наряду с изохронным проводился и изотермический отжиг облученных n^+ - p -структур при разных значениях обратного смещения. Во всех случаях концентрация C_i экспоненциально уменьшалась с ростом времени отжига. Были определены характеристические времена отжига C_i согласно выражению $\tau = \nu^{-1} \exp(\Delta E / kT)$ для исследуемых образцов при разных значениях $U_{см}$ (рис. 3). Для n^+ - p -структур первого типа в положительном ($U_{см} = 0$) зарядовом состоянии энергия активации отжига C_i составляет $\Delta E = 0,885 \pm 0,015 \text{ эВ}$ с частотным фактором $\nu = 1,24 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$, в то время как в нейтральном ($U_{см} = -20 \text{ В}$) – $\Delta E = 0,73 \pm 0,02 \text{ эВ}$ с $\nu = 9,49 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$. Как отмечалось

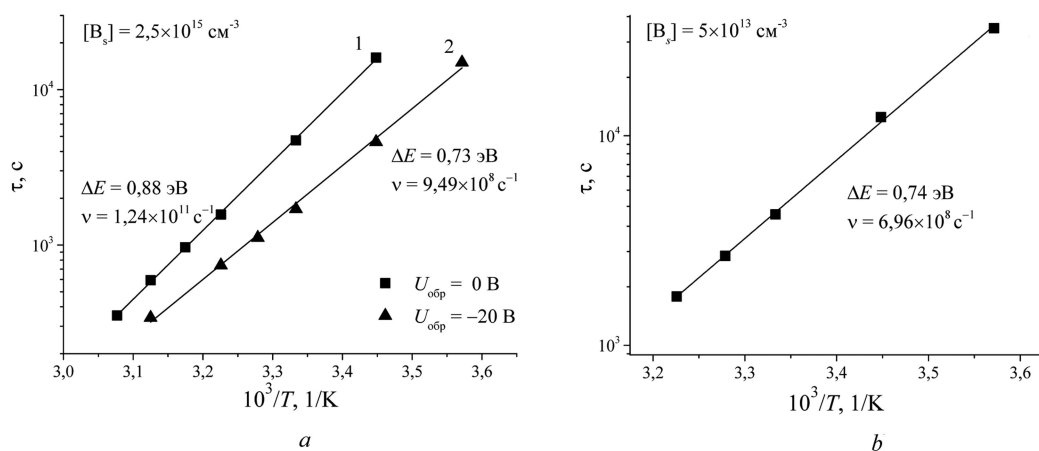


Рис. 3. Зависимости постоянных времени отжига C_i от температуры отжига для облученных n^+ - p -структур первого (а) и второго (б) типов

Fig. 3. Dependencies of elimination time constant of C_i versus annealing temperature for irradiated n^+ - p -structures of (a) the first and (b) the second types

выше, для n^+ - p -структур второго типа дефект C_i находится в нейтральном зарядовом состоянии независимо от значения $U_{см}$. Здесь энергия активации отжига составляет $\Delta E = 0,74 \pm 0,015$ эВ с частотным фактором $\nu = 6,96 \cdot 10^8$ с $^{-1}$, что коррелирует с данными по отжигу образцов первого типа при $U_{см} = -20$ В.

Таким образом, методом DLTS показано влияние зарядового состояния межузельных атомов углерода на кинетику их отжига в кремнии p -типа. Установлено, что скорость отжига C_i в положительном зарядовом состоянии существенно снижена по сравнению с таковой для нейтрального центра.

Благодарности. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант Ф17МС-022). Авторы выражают благодарность Л. Ф. Макаренко за предоставленные для экспериментальных исследований образцы n^+ - p -структур на p -Si с $[B_s] = 5 \cdot 10^{13}$ см $^{-3}$.

Acknowledgements. This work was partially supported by the Belarusian Foundation for Basic Research (project no. Ф17МС-022). The authors are grateful to L. F. Makarenko for the samples of n^+ - p -structures on p -Si with $[B_s] = 5 \cdot 10^{13}$ cm $^{-3}$ provided for experimental studies.

Список использованных источников

1. Davies, G. Carbon in monocrystalline silicon / G. Davies, R. C. Newman // Handbook on semiconductors; eds. T. S. Moss, S. Mahajan. – Amsterdam, 1994. – Vol. 3. – P. 1557–1643. [https://doi.org/10.1016/s0080-8784\(08\)60251-3](https://doi.org/10.1016/s0080-8784(08)60251-3)
2. Reactions of interstitial carbon with impurities in silicon particle detectors / L. F. Makarenko [et al.] // J. Appl. Phys. – 2007. – Vol. 101, N 11. – P. 113537(1–6). <https://doi.org/10.1063/1.2745328>
3. Bean, A. R. Low temperature electron irradiation of silicon containing carbon / A. R. Bean, R. C. Newman // Solid State Commun. – 1970. – Vol. 8, N 3. – P. 175–177. [https://doi.org/10.1016/0038-1098\(70\)90074-8](https://doi.org/10.1016/0038-1098(70)90074-8)
4. Watkins, G. D. EPR observation of the isolated interstitial carbon atom in silicon / G. D. Watkins, K. L. Brower // Phys. Rev. Lett. – 1976. – Vol. 36, N 22. – P. 1329–1332. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.36.1329>
5. Song, L. W. EPR identification of the single-acceptor state of interstitial carbon in silicon / L. W. Song, G. D. Watkins // Phys. Rev. B. – 1990. – Vol. 42, N 9. – P. 5759–5764. <https://doi.org/10.1103/physrevb.42.5759>
6. Electronic and vibrational absorption of interstitial carbon in silicon / R. A. Woolley [et al.] // Mater. Sci. Forum. – 1986. – Vol. 10–12. – P. 929–934. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.10-12.929>
7. Thonke, K. New photoluminescence defect spectra in silicon irradiated at 100 K: observation of interstitial carbon / K. Thonke, A. Teschner, R. Sauer // Solid State Commun. – 1987. – Vol. 61, N 4. – P. 241–244. [https://doi.org/10.1016/0038-1098\(87\)91010-6](https://doi.org/10.1016/0038-1098(87)91010-6)
8. Carbon interstitial in electron-irradiated silicon / Y. H. Lee [et al.] // Solid State Commun. – 1977. – Vol. 21, N 1. – P. 109–111. [https://doi.org/10.1016/0038-1098\(77\)91489-2](https://doi.org/10.1016/0038-1098(77)91489-2)
9. Kimerling, L. C. Defect states in proton-bombarded silicon at $T < 300$ K / L. C. Kimerling, P. Blood, W. M. Gibson // Defects and radiation effects in semiconductors, 1978 / ed. J. H. Albany. – London; Bristol: Institute of Physics, 1979. – Ser. 46. – P. 273–280.
10. Djerassi, H. Effects of ^{60}Co γ -rays on high resistivity p -type Si / H. Djerassi, J. Merlo-Flores, J. Messier // J. Appl. Phys. – 1966. – Vol. 37, N 12. – P. 4510–4516. <https://doi.org/10.1063/1.1708071>
11. Электрически активные дефекты межузельного типа в облученном n -кремнии / А. Г. Литвинко [и др.] // ФТП. – 1980. – Т. 14, № 4. – С. 776–780.
12. Efficiency of interaction of interstitial carbon with oxygen, tin, and substitution carbon in irradiated silicon / M. I. Gritsenko [et al.] // Ukr. J. Phys. – 2010. – Vol. 55, N 2. – P. 222–227.
13. Studies of defects introduced by electron irradiation at 4.2 K in p -silicon by thermally stimulated capacitance technique / J. C. Brabant [et al.] // J. Appl. Phys. – 1976. – Vol. 47, N 11. – P. 4809–4813. <https://doi.org/10.1063/1.322522>
14. Tipping, A. K. The diffusion coefficient of interstitial carbon in silicon / A. K. Tipping, R. C. Newman // Semicond. Sci. Technol. – 1987. – Vol. 2, N 5. – P. 315–317. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/2/5/013>
15. Green, M. A. Intrinsic concentration, effective densities of states, and effective mass in silicon / M. A. Green // J. Appl. Phys. – 1990. – Vol. 67, N 6. – P. 2944–2954. <https://doi.org/10.1063/1.345414>

References

1. Davies G., Newman R. C. Carbon in monocrystalline silicon. Moss T. S., Mahajan S., eds. *Handbook on semiconductors*. Amsterdam, 1994, vol. 3, pp. 1557–1643. <https://doi.org/10.1002/cvde.19960020108>
2. Makarenko L. F., Moll M., Korshunov F. P., Lastovski S. B. Reactions of interstitial carbon with impurities in silicon particle detectors. *Journal of Applied Physics*, 2007. vol. 101, no. 11, pp. 113537(1–6). <https://doi.org/10.1063/1.2745328>
3. Bean A. R., Newman R. C. Low temperature electron irradiation of silicon containing carbon. *Solid State Communications*, 1970, vol. 8, no. 3, pp. 175–177. [https://doi.org/10.1016/0038-1098\(70\)90074-8](https://doi.org/10.1016/0038-1098(70)90074-8)
4. Watkins G. D., Brower K. L. EPR observation of the isolated interstitial carbon atom in silicon. *Physical Review Letters*, 1976, vol. 36, no. 22, pp. 1329–1332. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.36.1329>
5. Song L. W., Watkins G. D. EPR identification of the single-acceptor state of interstitial carbon in silicon. *Physical Review B*, 1990, Vol. 42, no. 9, pp. 5759–5764. <https://doi.org/10.1103/physrevb.42.5759>

6. Woolley R. A., Woolley R., Lightowers E. C., Tipping A. K., Claybourn M., Newman R. C. Electronic and vibrational absorption of interstitial carbon in silicon. *Materials Science Forum*, 1986, vol. 10–12, pp. 929–934. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.10-12.929>
7. Thonke K., Teschner A., Sauer R. New photoluminescence defect spectra in silicon irradiated at 100 K: observation of interstitial carbon. *Solid State Communications*, 1987, vol. 61, no. 4, pp. 241–244. [https://doi.org/10.1016/0038-1098\(87\)91010-6](https://doi.org/10.1016/0038-1098(87)91010-6)
8. Lee Y. H., Cheng L. J., Gerson J. D., Mooney P. M., Corbett J. W. Carbon interstitial in electron-irradiated silicon. *Solid State Communications*, 1977, vol. 21, no. 1, pp. 109–111. [https://doi.org/10.1016/0038-1098\(77\)91489-2](https://doi.org/10.1016/0038-1098(77)91489-2)
9. Kimerling L. C., Blood P., Gibson W. M. Defect states in proton-bombarded silicon at $T < 300$ K. Albany J. H. (ed.). *Defects and radiation effects in semiconductors*. London, Bristol, Institute of Physics, 1979, ser. 46, pp. 273–280.
10. Djerassi H., Merlo-Flores J., Messier J. Effects of ^{60}Co γ -rays on high resistivity p -type Si. *Journal of Applied Physics*, 1966, vol. 37, no. 12, pp. 4510–4516. <https://doi.org/10.1063/1.1708071>
11. Litvinko A. G., Makarenko L. F., Murin L. I., Tkachev V. D. Electrically active interstitial defects in irradiated n -silicon. *Fizika i tehnika poluprovodnikov = Semiconductors*, 1980, vol. 14, no. 4, pp. 776–780 (in Russian).
12. Gritsenko M. I., Kobzar O. O., Pomozov Y. V., Sosnin M. G., Khirunenko L. I. Efficiency of interaction of interstitial carbon with oxygen, tin, and substitution carbon in irradiated silicon. *Ukrainian Journal of Physics*, 2010, vol. 55, no. 2, pp. 222–227.
13. Brabant J. C., Pugnet M., Barbolla J., Brousseau M. Studies of defects introduced by electron irradiation at 4.2 K in p -silicon by thermally stimulated capacitance technique. *Journal of Applied Physics*, 1976, vol. 47, no. 11, pp. 4809–4813. <https://doi.org/10.1063/1.322522>
14. Tipping A. K., Newman R. C. The diffusion coefficient of interstitial carbon in silicon. *Semiconductor Science and Technology*, 1987, vol. 2, no. 5, pp. 315–317. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/2/5/013>
15. Green M. A. Intrinsic concentration, effective densities of states, and effective mass in silicon. *Journal of Applied Physics*, 1990, vol. 67, no. 6, pp. 2944–2954. <https://doi.org/10.1063/1.345414>

Информация об авторах

Коршунов Федор Павлович – член-корреспондент, д-р техн. наук, профессор, гл. науч. сотрудник. НИЦ НАН Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: korshun@ifftp.bas-net.by.

Ластовский Станислав Брониславович – канд. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией. НИЦ НАН Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: lastov@ifftp.bas-net.by.

Якушевич Анна Сергеевна – мл. науч. сотрудник. НИЦ НАН Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: yakushevich@ifftp.bas-net.by.

Маркевич Владимир Павлович – канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник. Университет г. Манчестер (ул. Sackville, Манчестер M139PL, Великобритания). E-mail: V.Markevich@manchester.ac.uk.

Мурин Леонид Иванович – канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник. НИЦ НАН Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: murin@ifftp.bas-net.by.

Information about the authors

Korshunov Fedor Pavlovich – Corresponding Member, D. Sc. (Engineering), Professor, Chief researcher. Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: korshun@ifftp.bas-net.by.

Lastovskii Stanislav Bronislavovich – Ph. D. (Physics and Mathematics), Head of the Laboratory. Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lastov@ifftp.bas-net.by.

Yakushevich Hanna Sergeevna – Junior researcher. Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: yakushevich@ifftp.bas-net.by.

Markevich Vladimir Pavlovich – Ph. D. (Physics and Mathematics), Researcher. University of Manchester (Sackville Str., Manchester M139PL, United Kingdom). E-mail: V.Markevich@manchester.ac.uk.

Murin Leonid Ivanovich – Ph. D. (Physics and Mathematics), Leading Researcher. Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: murin@ifftp.bas-net.by.