

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. R. Kalish, A. Reznik, S. Prawer, D. Saada, J. Adler. *Physica Status Solidi (a)*. 174(1), 83 (1999).
2. A.M. Zaitsev. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 62(1), 81 (1991).
3. Н.М. Казючиц, А.В. Коновалова, И.И. Азарко, Ф.Ф. Якоцук, И.Н. Богданов, Ю.К. Кабак. *Неорганические материалы*. 50(2), 144 (2014).
4. N. V. Surovtsev, I. N. Kupriyanov, V. K. Malinovsky, V. A. Gusev, Yu. N. Pal'yanov. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 11(24), 4767 (1999).
5. O. N. Poklonskaya, S. A. Vyrko, A. A. Khomich, A. A. Averin, A. V. Khomich, R. A. Khmel'nitsky, N. A. Poklonski. *Journal of Applied Spectroscopy*. 81(6), 969 (2015).
6. A. V. Khomich, R. A. Khmel'nitskii, X. J. Hu, A. A. Khomich, A. F. Popovich, I. I. Vlasov, V. A. Dravin, Y. G. Chen, A. E. Karkin, V. G. Ralchenko. *Journal of Applied Spectroscopy*. 80(5), 707 (2013).
7. R. Brunetto, G.A. Baratta, G. Strazzulla. In *Journal of Physics: Conference Series*. 6 (1), 120 (2005).
8. F. Ahmed, K. Durst, S. Rosiwal, J. Fandrey, J. Schaufler, M. Göken. *Surface and Coatings Technology*. 204 (6-7), 1022 (2009).

## ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБЛУЧЕНИЯ ( $T_{\text{обл}} = 80\text{--}700\text{ К}$ ) БЫСТРЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ И $\gamma$ -КВАНТАМИ $^{60}\text{Co}$ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФОРМИРОВАНИЯ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В КРЕМНИИ $p$ -ТИПА

И. Ф. Медведева<sup>1</sup>, Л. И. Мурин<sup>2</sup>, В. П. Маркевич<sup>3</sup>,  
С. Б. Ластовский<sup>2</sup>, Е. А. Фадеева<sup>2</sup>

---

<sup>1)</sup> *Белорусский государственный медицинский университет, пр. Дзержинского 83, 220016 Минск, Беларусь, e-mail: medvedeva@ifftp.bas-net.by*

<sup>2)</sup> *ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», П. Бровка 19, 220072 Минск, Беларусь, e-mail: murin@ifftp.bas-net.by,*

<sup>3)</sup> *The University of Manchester, Manchester M60 1QD, United Kingdom, e-mail: v.markevich@manchester.ac.uk*

Методами эффекта Холла и DLTS изучено влияние температуры облучения ( $T_{\text{обл}}$ ) быстрыми электронами и  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  на эффективность формирования радиационных дефектов (РД) в кремнии  $p$ -типа. Показано, что в области термической стабильности РД имеет место увеличение их скорости генерации с ростом  $T_{\text{обл}}$ . Данный эффект обнаружен для междоузельных атомов углерода, а также для комплексов междоузельный углерод - междоузельный кислород и междоузельный бор - междоузельный кислород. Предполагается, что это обусловлено увеличением вероятности разделения близких пар Френкеля с ростом  $T_{\text{обл}}$ .

**Ключевые слова:**  $p$ -кремний; температура облучения; радиационные дефекты; DLTS; эффект Холла.

# EFFECT OF IRRADIATION TEMPERATURE ( $T_{\text{IRR}} = 80\text{--}700\text{ K}$ ) WITH FAST ELECTRONS AND $^{60}\text{Co}$ $\gamma$ -RAYS ON PRODUCTION OF RADIATION-INDUCED DEFECTS IN $p$ -TYPE Si

I. F. Medvedeva<sup>1</sup>, L. I. Murin<sup>2, 3</sup>, V. P. Markevich<sup>3</sup>,  
S. B. Lastovskii<sup>2</sup>, A. A. Fadzeyeva<sup>2</sup>

---

<sup>1)</sup> *Belarusian State Medical University, Dzerzhinski av. 83, 220116 Minsk, Belarus,*

<sup>2)</sup> *Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus,  
P. Brovki str. 19, 220072 Minsk,*

<sup>3)</sup> *The University of Manchester, Manchester M60 1QD, United Kingdom  
Corresponding author: I.F. Medvedeva (medvedeva@jftpt.bas-net.by)*

Effect of irradiation temperature ( $T_{\text{irr}}$ ) with fast electrons and  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -rays on the generation rate of radiation-induced defects (RDs) in  $p$ -type Si has been studied by means of DLTS and Hall effect. It is found that the growth of  $T_{\text{irr}}$  results in an increase of the RD production rate. It is suggested that the observed effect is related to an increase in the separation probability of close Frenkel pairs with the  $T_{\text{irr}}$  growth.

**Key words:**  $p$ -silicon; irradiation temperature; radiation-induced defects; DLTS; Hall effect.

## ВВЕДЕНИЕ

При использовании методов радиационной технологии регулирование динамических характеристик полупроводниковых приборов осуществляется, как правило, облучением их электронами или  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  [1]. Образующиеся радиационные дефекты (РД) используются в роли центров рекомбинации неосновных носителей заряда. Тип и скорость введения РД определяется рядом факторов, в том числе и температурой облучения. С точки зрения радиационной технологии наибольший интерес представляют дефекты, обладающие высокой термической стабильностью. Такие РД могут создаваться как в процессе высокотемпературного отжига кристаллов Si, облученных при комнатной температуре, так и в процессе облучения при повышенных температурах. При этом облучение при более высоких температурах, как правило, не эквивалентно низкотемпературному облучению с последующим отжигом. При повышенных температурах облучения могут происходить существенные изменения как в спектре РД, так и в эффективности введения дефектов (ЭВД) конкретного типа [2]. Следует отметить, что имеющиеся в литературе данные по влиянию температуры облучения быстрыми электронами на эффективность образования РД в Si весьма противоречивы и относятся в основном к материалам  $n$ -типа проводимости [3–5]. В данной работе исследовалось влияние температуры облучения быстрыми электронами и  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  на эффективность образования РД в кристаллах кремния  $p$ -типа при  $T_{\text{обл}} = 80\text{--}700\text{ K}$ .

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследовались кристаллы кремния  $p$ -типа ( $\rho = 20000\text{ Ом}\cdot\text{см}$ ), полученные методом зонной плавки в вакууме (Fz-Si), а также эпитаксиальные  $n^+p$ -структуры и структуры на основе  $p$ -Si, полученного методом Чохральского (Cz-Si). Исследуемые образцы и структуры облучались  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  в интервале температур 200–315 K

и электронами ( $E = 6$  МэВ, интенсивность  $10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ ) в интервале температур 80–700 К. Измерения температурных зависимостей концентрации носителей заряда в кристаллах Si проводились методом эффекта Холла в диапазоне температур 77–400 К. Спектры DLTS облученных  $n^+p$ -структур измерялись в диапазонах температур 40–300 К либо 80–350 К.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 1 показаны зависимости скорости введения одного из основных РД в  $p$ - кремнии – междуузельных атомов углерода  $C_i$ , обладающих донорным уровнем у  $E_V + 0,27$  эВ ( $D_{0,27}$ ) [6, 7], в высокоомных кристаллах Fz-Si от температуры облучения  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$ . Как видно из представленных данных, с понижением  $T_{\text{обл}}$  ЭВД существенно падает. Этот результат подтверждается и данными, полученными методом DLTS для облученных быстрыми электронами  $n^+p$ -структур на основе Cz-Si (рисунок 2). Если эффективность введения дивакансий (пик у 120 К) при низкотемпературном облучении даже несколько превышает таковую при  $T_{\text{обл}} \sim 300$  К, то скорость формирования комплекса углерод внедрения - кислород внедрения  $C_iO_i$  (пик у 200 К) намного выше при комнатном облучении.

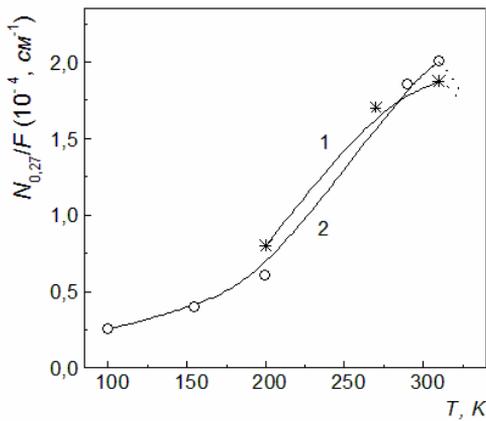


Рисунок 1. – Изменение скорости введения  $D_{0,27}$  в  $p$ -Fz-Si с температурой облучения гамма-квантами  $^{60}\text{Co}$ : 1 – Fz-Si, 2 – зависимость, полученная в работе [4]

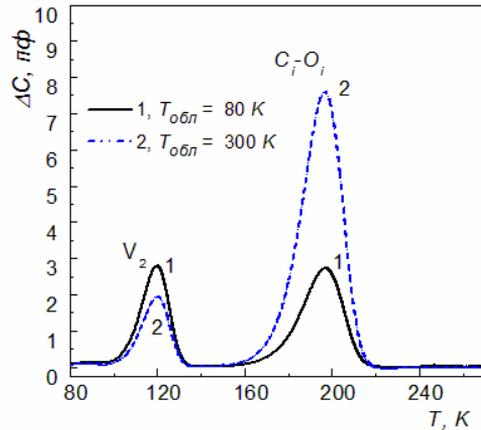


Рисунок 2. – DLTS-спектры структур на основе Cz-Si ( $p = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ) облученных быстрыми электронами ( $E = 6$  МэВ,  $\Phi = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ ) при 80 К, с последующим отжигом при 375 К, и при 300 К

На рисунке 3 представлены DLTS-спектры одного из образцов на основе эпитаксиального  $p$ -Si после облучения электронами при  $T_{\text{обл}} = 340$  К. В результате облучения в базовую  $p$ -область диодных  $n^+p$ -структур вводятся РД, перезарядка глубоких уровней которых приводит к возникновению на спектрах максимумов  $H_1$ ,  $H_2$  и минимума  $E_1$ . В целом вид DLTS спектра типичен для облученного электронами  $p$ -Si (см., например, работу 8 и ссылки там). Пик  $H_1$  обусловлен дивакансией, пик  $H_2$  – комплексом  $C_iO_i$ , пик  $E_1$  – комплексом бор внедрения - кислород внедрения  $B_iO_i$ .

Аналогичные образцы облучались одним и тем же флюенсом электронов  $\Phi = 8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  при более высоких температурах. На рисунке 4 показаны зависимости

амплитуд DLTS пиков перечисленных выше РД, от температуры облучения образцов. Полученные результаты позволяют судить о скорости введения дефектов в зависимости от  $T_{обл}$ . Для комплексов  $V_iO_i$  и  $C_iO_i$  скорость введения максимальна при 420–460 К и 620–670 К, соответственно. При более низких  $T_{обл}$  амплитуды пиков  $V_iO_i$  и  $C_iO_i$  центров уменьшаются примерно в 2 раза. Исчезновение пиков из DLTS спектров структур облученных при более высоких  $T_{обл}$  связано с термическим отжигом этих дефектов. Скорость введения дивакансий в меньшей степени зависит от температуры облучения. При  $T_{обл} = 340–550$  К амплитуда пика  $V_2$  изменяется всего лишь на 25–35%.

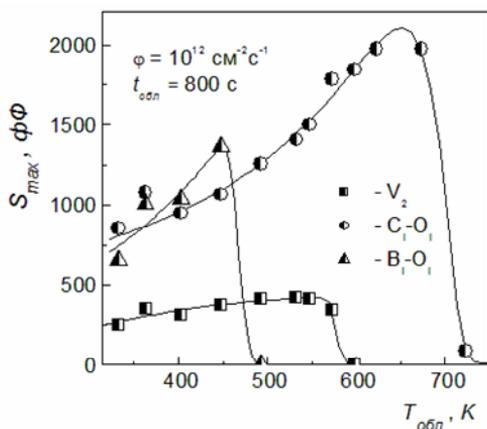


Рисунок 3. – DLTS-спектры образца  $p$ -Si ( $N_B = 7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ) облученного электроном ( $\Phi = 8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ) при  $T_{обл} = 340$  К. Сплошная линия получена при перезарядке ловушек основными носителями заряда, штриховая – неосновными

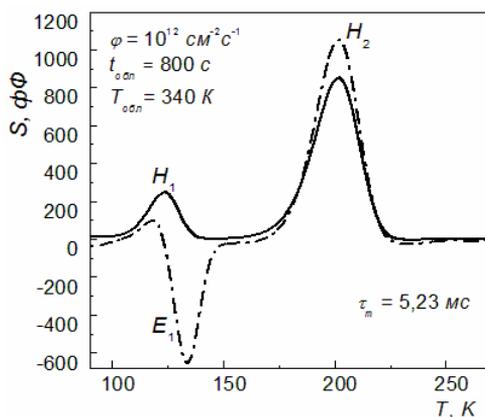


Рисунок 4. – Зависимости значений амплитуд DLTS пиков от температуры облучения диодных  $n^+$ - $p$ -структур, изготовленных на эпитаксиальном кремнии

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный изохронный отжиг структур, облученных при комнатной температуре, показал, что в области температур 550–600 К имеет место некоторый рост концентрации комплексов  $C_iO_i$ . Однако этот рост намного ниже такового, обусловленного изменением температуры облучения. Очевидно, что наблюдаемая зависимость эффективности образования комплексов  $C_iO_i$  от  $T_{обл}$  в области температур 300–650 К связана в первую очередь с первичными процессами дефектообразования. Известно, что с ростом температуры несколько уменьшается пороговая энергия образования пар Френкеля, что может приводить к увеличению скорости генерации РД. Однако, по-видимому, большую роль играет влияние  $T_{обл}$  на вероятность разделения близких пар Френкеля. С ростом  $T_{обл}$  эта вероятность увеличивается, что подтверждается также квантово-химическими расчетами влияния температуры на вероятность разделения пар Френкеля [9]

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке БРФФИ (проект Ф17МС-022).

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Коршунов, Ф.П. Радиационная технология изготовления мощных полупроводниковых приборов / Ф.П. Коршунов, Ю.В. Богатырев // Изв. НАН Беларуси. Сер. физ.-тех. наук. - 2008. - № 4. - С.106 – 114.
2. Defect engineering in Czochralski silicon by electron irradiation at different temperatures / J.L. Lindstrom [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B. - 2002. – V.186. - P. 1012 - 1014.
3. DLTS studies of high-temperature electron irradiated Cz n-Si / V. Neimash [et al.] // Phys. Status Solidi A. - 2004. –V. 201, № 3. - P. 509 - 516.
4. Formation of radiation-induced defects in Si crystals irradiated with electrons at elevated temperatures / V.P. Markevich [et al.] // Solid State Phenomena. - 2010. – V. 156-158. - P. 299 – 304.
5. Влияние примесного состава и температуры облучения на эффективность образования радиационных дефектов в кремнии / Ф.П. Коршунов [и др.] // Доклады НАН Беларуси. - 2011. – Т. 55, № 3. - С. 110 – 114.
6. Djerassi, H. Effect of  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -rays on high-resistivity p-type Si / H. Djerassi. J. Merlo-Flores, J. Messier // J. Appl. Phys. – 1966. - V. 37, № 12. – P. 4510–4516.
7. Radiation-induced interstitial carbon atom in silicon: Effect of charge state on annealing characteristics / S.B. Lastovskii [et al.] // Phys. Status Solidi A. – 2017. – V. 214, №. 7. – P. 1700262 (1–6).
8. Donor levels of the divacancy-oxygen defect in silicon / V.P. Markevich [et al.] // J. Appl. Phys. – 2014. – V. 115, N 1. - P. 012004 (1–6).
9. Особенности формирования радиационных дефектов в кремнии при повышенных температурах облучения // Коршунов Ф.П.[и др.] // Изв. НАН Беларуси. Сер. физ.-мат. наук. – 2013. – № 3. - С. 101–106.

## ИНЖЕНЕРИЯ КИСЛОРОДОСОДЕРЖАЩИХ ЦЕНТРОВ В КРЕМНИИ: РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННЫЕ ТРАНСФОРМАЦИИ ВАКАНСИОННО-КИСЛОРОДНЫХ КОМПЛЕКСОВ $\text{VO}_2$ , $\text{V}_2\text{O}_2$ И $\text{V}_3\text{O}_2$

Л. И. Мурин<sup>1</sup>, Е. А. Толкачева<sup>1</sup>, С. Б. Ластовский<sup>1</sup>, В. П. Маркевич<sup>2</sup>

<sup>1)</sup> ГГО «НППЦ НАН Беларуси по материаловедению», П. Бровка 19, 220072 Минск, Беларусь,  
e-mail: murin@ifftp.bas-net.by

<sup>2)</sup> The University of Manchester, Manchester M60 1QD, United Kingdom,  
e-mail: v.markevich@manchester.ac.uk

Двухступенчатое электронное облучение использовано для инженерии кислородосодержащих дефектов в кремнии, полученном методом Чохральского (Cz-Si). Сначала образцы Cz-Si облучали при комнатной температуре электронами с энергией 2,5 МэВ и подвергали термообработке при 320 °С в течение 30 часов для отжига центров  $\text{VO}$ ,  $\text{V}_2\text{O}$  и  $\text{V}_3\text{O}$  и генерации комплексов  $\text{VO}_2$ ,  $\text{V}_2\text{O}_2$  и  $\text{V}_3\text{O}_2$  в качестве доминирующих вакансионно-кислородных центров. Затем образцы снова облучали при комнатной температуре. Эволюция дефектов в результате обработок контролировалась методом спектроскопии локальных колебательных мод (ЛКМ). Спектры ИК поглощения измерялись на Фурье спектрометре при 20 К и 300 К. Из анализа изменений интенсивности ЛКМ линий обнаружено, что второе облучение приводит к заметному уменьшению концентраций комплексов  $\text{VO}_2$ ,  $\text{V}_2\text{O}_2$  и  $\text{V}_3\text{O}_2$  и к существенному росту концентраций кислородного димера и дефекта  $\text{VO}_2^*$ .

**Ключевые слова:** кремний; облучение; вакансионно-кислородные дефекты; собственные междоузельные атомы; локальные колебательные моды.