

4. Study of HPHT single crystal diamond as precision cutting tool material/ Z.Y. Wang [et al.]// Precision Engineering. – 2012. –V.36.–P.162–167.
5. Гусаков, Г. А. Влияние примесного состава на износостойкость монокристаллов синтетического алмаза / Г.А. Гусаков, Г.В. Шаронов, И.И. Азарко// Актуальные проблемы прочности: материалы международной научной конференции, Витебск, 23-27 мая 2022 года / под ред. В.В. Рубаника.–Минск: –2022.– С. 29–31.
6. Yelisseyev, A. Optical centers related to 3d transition metal in diamond / A. Yelisseyev, H. Kanda // New Diamond and Frontier Carbon Technology. –2007. –V.17.– P.128–178.
7. Влияние электронного облучения на никельсодержащие дефекты в алмазе / И.И. Азарко [et al.]// Взаимодействие излучений с твердым телом: материалы 14-й Междунар. конф., посвящ. 100-летию Белорус. гос. ун-та, Минск, Беларусь, 21–24 сент. 2021 г. / Белорус. гос. ун-т; редкол.: В. В. Углов (гл. ред.) [и др.]. – Минск: БГУ, 2021.– С.132–136.
8. Zaitsev, A.M. Optical Properties of Diamond: A Data Handbook /A.M. Zaitsev. –Berlin, Springer. – 2001–502 p.

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ОБРАЗОВАНИЕ РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ЦЕНТРОВ В КРЕМНИЙ-ГЕРМАНИЕВЫХ СПЛАВАХ *p*-ТИПА ПРИ ОБЛУЧЕНИИ АЛЬФА-ЧАСТИЦАМИ

**Д. Н. Жданович¹, Н. Е. Жданович¹, С. Б. Ластовский¹, В. П. Маркевич²,
И. Ф. Медведева³, Д. А. Огородников¹, Е. А. Фадеева¹**

¹⁾ *Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению, Минск, Беларусь, d_jdanovich@physics.by;*

²⁾ *Университет г. Манчестер, M13 9PL Манчестер, Англия, V.Markevich@manchester.ac.uk*

³⁾ *Белорусский государственный медицинский университет, 220116, пр. Дзержинского, 83, Минск, Беларусь, medvedeva@ifftp.bas-net.by*

Показано, что при облучении альфа частицами обратно-смещенных диодных структур на основе кристаллов *p*-SiGe скорость удаления основных носителей заряда значительно снижена в области пространственного заряда (ОПЗ) диодов по сравнению с квазинейтральной областью. Наблюдаемый эффект связан с инжекционно-ускоренной миграцией собственных межузельных атомов кремния и их взаимодействием с другими дефектами решетки в ОПЗ диодов во время облучения.

Ключевые слова: кремний-германиевый сплав; альфа-частица; глубокий уровень; радиационно-индуцированный центр; DLTS-спектроскопия.

EFFECT OF ELECTRIC FIELD ON FORMATION OF RADIATION-INDUCED DEFECTS IN *p*-TYPE SILICON-GERMANIUM ALLOYS UPON IRRADIATION WITH ALFA PARTICLES

**D. N. Jdanovich¹, N. E. Jdanovich¹, S. B. Lastovskii¹, V.P. Markevich²,
I. F. Medvedeva³, D. A. Aharodnikau¹, A. A. Fadzeyeva¹**

¹⁾ *Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus, 220072 Minsk, Belarus*

²⁾ *The University of Manchester, Manchester M13 9PL, United Kingdom*

³⁾ *Belarusian State Medical University, Minsk, Republic of Belarus*

Corresponding author: D. N. Jdanovich (zhdanovich_d@ifftp.bas-net.by)

It is found that the removal rate of majority charge carriers is significantly reduced in depleted regions of reverse-biased SiGe-based n^+p -diodes compared to that in the neutral regions upon irradiation with alpha particles. The observed effect is related to injection-enhanced mobility of Si self-interstitial atoms and their interactions with other lattice defects in the depleted regions of the diodes during irradiation.

Key words: silicon-germanium alloy; alpha particle; deep level; radiation-induced center; DLTS spectroscopy.

ВВЕДЕНИЕ

В работах [1–3] на основании анализа вольт-фарадных зависимостей рассмотрено изменение распределения концентрации дырок $p(x)$ в базовых областях кремниевых диодных n^+p -структур в результате облучения α -частицами в режимах обратных смещений ($U_{см} = -5 \div -10$ В), а также без смещения при температуре 290 К. Установлено, что на зависимостях $p(x)$ n^+p -структур, облучаемых под обратным смещением, возникает участок немонотонности, который обусловлен меньшей скоростью удаления дырок в области пространственного заряда (ОПЗ) по сравнению с квазинейтральной частью базы. Участок немонотонности на зависимостях $p(x)$ исчезает после инжекции неосновных носителей заряда в базовую p -область. Методом релаксационной спектроскопии глубоких уровней показано, что различие в скоростях удаления дырок в ОПЗ и квазинейтральной части базы в процессе облучения связано с особенностями термического и стимулированного инжекцией неосновных носителей заряда (ННЗ) отжига собственных междуузельных атомов кремния (Si_i) в материале p -типа. Интерес представляет исследование влияния на этот процесс примеси германия.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для исследований использовались диффузионные n^+p -структуры, изготовленные на пластинах $Si_{10,954}Ge_{0,046}$ p -типа, легированных бором в концентрации $[B] = 4-5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Облучение образцов проводилось альфа-частицами с энергией 5 МэВ при температуре 290–295 К. Одна часть образцов облучалась при обратных смещениях $U_{см} = -8$ и -16 В, вторая – без обратного смещения. Отжиг облученных образцов при 100 °С в течение 30 минут проводился в печи на воздухе.

В работе определялось распределение концентрации носителей заряда $p(x)$ в базовых областях диодных n^+p -структур до и после облучения из анализа вольтфарадных характеристик. Барьерная емкость измерялась при $T = 300$ К на частоте 1 МГц с помощью измерителя LCR E7-12.

Определение характеристик радиационных дефектов (энергия активации эмиссии и сечение захвата носителей заряда) в базовой области n^+p -структур на основе $p\text{-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ осуществлялось методом нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней (Deep Level Transient Spectroscopy – DLTS). Спектры измерялись при значении окна скорости эмиссии $e_m = 19 \text{ с}^{-1}$ и длительности импульса заполнения ловушек 10^{-2} с в диапазоне температур 80–300 К. Спектры записывались в режимах заполнения ловушек как основными (дырки), так и неосновными (электроны) носителями заряда. Использовались разные значения напряжений смещения $U_{см}$ и заполнения $U_{зап}$. Для образцов, облучаемых при обратных смещениях $U_{см} = 0$ и -8 В сравнение типов и концентраций ловушек в пределах ОПЗ осуществлялось при

$U_{см} = -5$ и $U_{зап} = -1$ В, в вне ОПЗ — $U_{см} = -16$ и $U_{зап} = -10$ В. В режимах заполнения ловушек неосновными носителями заряда спектры записывались при $U_{см} = -5$ и $U_{зап} = +2$ В для всех облученных образцов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты CV-измерений. На рис. 1 показаны профили концентрации подвижных носителей заряда $p(x)$ в базовой p -области диодных n^+p -структур на $p\text{-Si}_{0,954}\text{Ge}_{0,046}$ до и после облучения альфа-частицами в течение 720 минут без смещения, пропускания прямого тока $I_{пр} = 0,2$ А при 300 К и термического отжига при $T_{отж} = 100$ °С в течение 30 мин. После облучения концентрация дырок в $p\text{-Si}_{0,954}\text{Ge}_{0,046}$ уменьшается. При $x = 2$ мкм она уменьшилась в 1,15 раза. После пропускания прямого тока значение p частично восстанавливается. Так, при $x = 2$ мкм оно увеличилось примерно в 1,1 раза. Последующий термический отжиг образцов ведет к весьма незначительным уменьшениям p (особенно при $x \geq 1,3$ мкм).

На рис. 2 представлены профили концентрации подвижных носителей заряда в базовой области диодных n^+p -структур на $p\text{-Si}_{0,954}\text{Ge}_{0,046}$ до и после облучения альфа-частицами в течение 720 минут при различных значениях обратного смещения. В целом, полученные результаты повторяют данные, полученные в [2,3] для барьерных структур на $p\text{-Si}$. Участок немонотонности на зависимостях $p(x)$ облученных образцов смещается в глубину p -области с ростом обратного смещения. Значения x , соответствующие этим участкам, совпадают приблизительно с толщинами областей пространственного заряда n^+p -структур при обратных смещениях, равных $U_{см} = -8$ и -16 В. Во всех случаях скорость введения радиационных дефектов в ОПЗ обратных смещенных n^+p -структур на $p\text{-Si}_{0,954}\text{Ge}_{0,046}$ ниже, чем в нейтральной части p -базы.

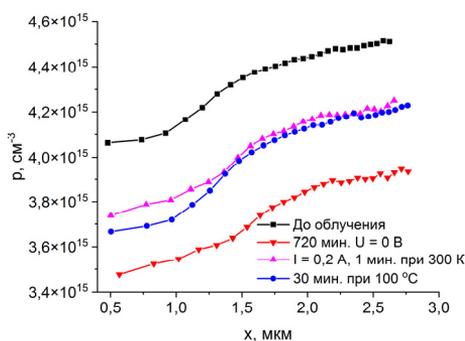


Рисунок 1. Профили концентрации подвижных носителей заряда в базовой области диодных n^+p -структур на $p\text{-Si}_{0,954}\text{Ge}_{0,046}$ до и после облучения альфа-частицами в течение 720 минут без смещения, пропускания прямого тока $I_{пр} = 0,2$ А при 300 К и термического отжига при $T_{отж} = 100$ °С в течение 30 мин

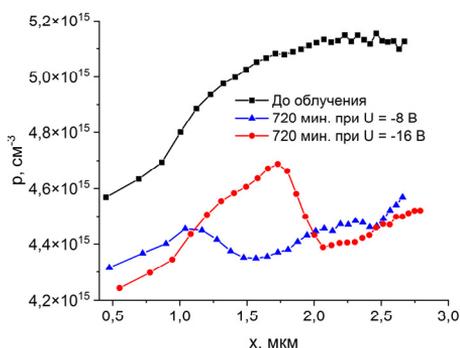


Рисунок 2. Профили концентрации подвижных носителей заряда в базовой области диодных n^+p -структур на $p\text{-Si}_{0,954}\text{Ge}_{0,046}$ до и после облучения альфа-частицами в течение 720 минут при различных значениях обратного смещения

Данные DLTS-измерений. На рис. 3 представлены DLTS-спектры n^+p -структуры на $p\text{-Si}_{0,954}\text{Ge}_{0,046}$ после облучения альфа-частицами в течение 720 минут без обратного

го смещения, пропускания прямого тока $I_{пр} = 0,05$ А при 300 К в течение 1 мин. и отжига при 100 °С в течение 30 мин. В результате облучения в базовую область диодных n^+p -структур вводятся радиационные дефекты с глубокими уровнями, перезарядка которых приводит к появлению на спектрах максимумов и минимумов. Типы ловушек, ответственных за возникновение на спектрах пиков, указаны на рисунке и описаны нами в [2–3]. После инжекционной обработки возросли амплитуды пиков ловушки междоузельный углерод C_i , а после термической — появились пики комплекса междоузельный углерод - междоузельный кислород C_iO_i (рис. а и б). Данный эффект проявляется при измерении спектров при разных значениях обратного смещения, то есть по всей глубине p -базы. Спектр в режиме инжекции измерялся только после инжекционной и термической обработок (рис. в).

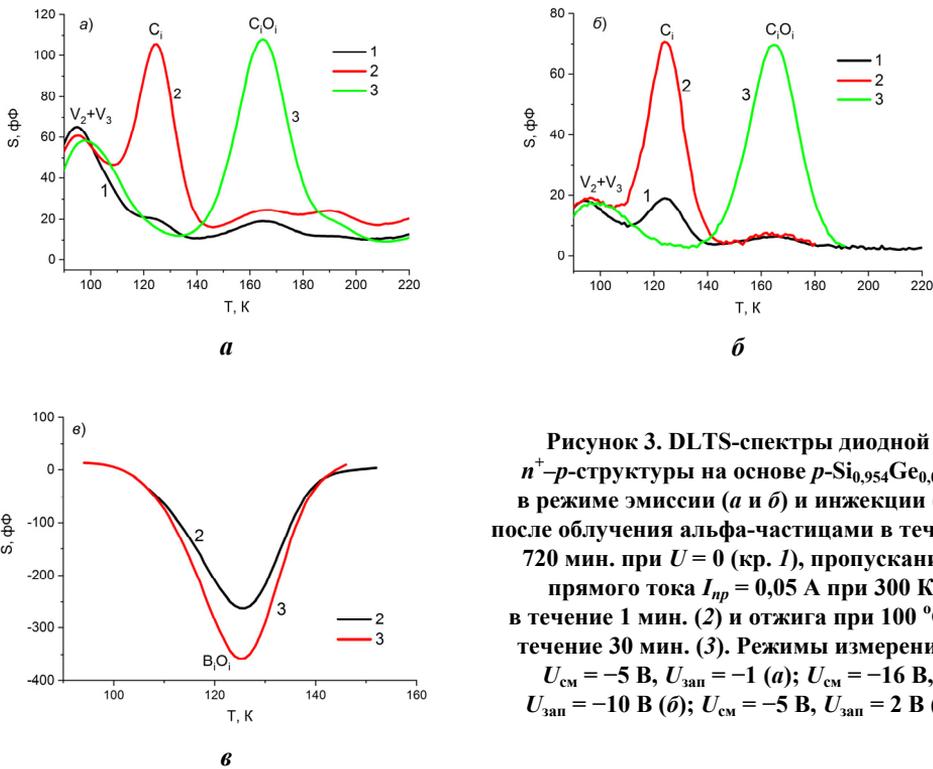


Рисунок 3. DLTS-спектры диодной n^+p -структуры на основе $p\text{-Si}_{0,954}\text{Ge}_{0,046}$ в режиме эмиссии (а и б) и инжекции (в) после облучения альфа-частицами в течение 720 мин. при $U = 0$ (кр. 1), пропускания прямого тока $I_{пр} = 0,05$ А при 300 К в течение 1 мин. (2) и отжига при 100 °С в течение 30 мин. (3). Режимы измерения: $U_{см} = -5$ В, $U_{зап} = -1$ (а); $U_{см} = -16$ В, $U_{зап} = -10$ В (б); $U_{см} = -5$ В, $U_{зап} = 2$ В (в)

На рис. 4 показаны DLTS-спектры n^+p -структуры после облучения альфа-частицами в течение 720 минут при $U_{см} = -8$ В, пропускания прямого тока $I_{пр} = 0,05$ А при 300 К в течение 1 мин. и отжига при 100 °С в течение 30 мин. Вид спектров сразу после облучения на рис. а и б не отличается. То есть, в ОПЗ и квазинейтральную область p -базы вводятся одни и те же типы дефектов. Однако есть существенное различие в амплитудах пиков, соответствующих ловушке C_i . Видно, что в ОПЗ преимущественно ввелась ловушка C_i (рис. а). Ее амплитуда почти в два раза больше суммарной амплитуды ловушек вакансионного типа V_2+V_3 . В остальной части базы также присутствуют ловушки C_i , но в значительно меньшей степени (рис. б).

После инжекционной обработки возрастает амплитуда пика S_i в спектре, измеренном главным образом за пределами ОПЗ (рис. 4, б).

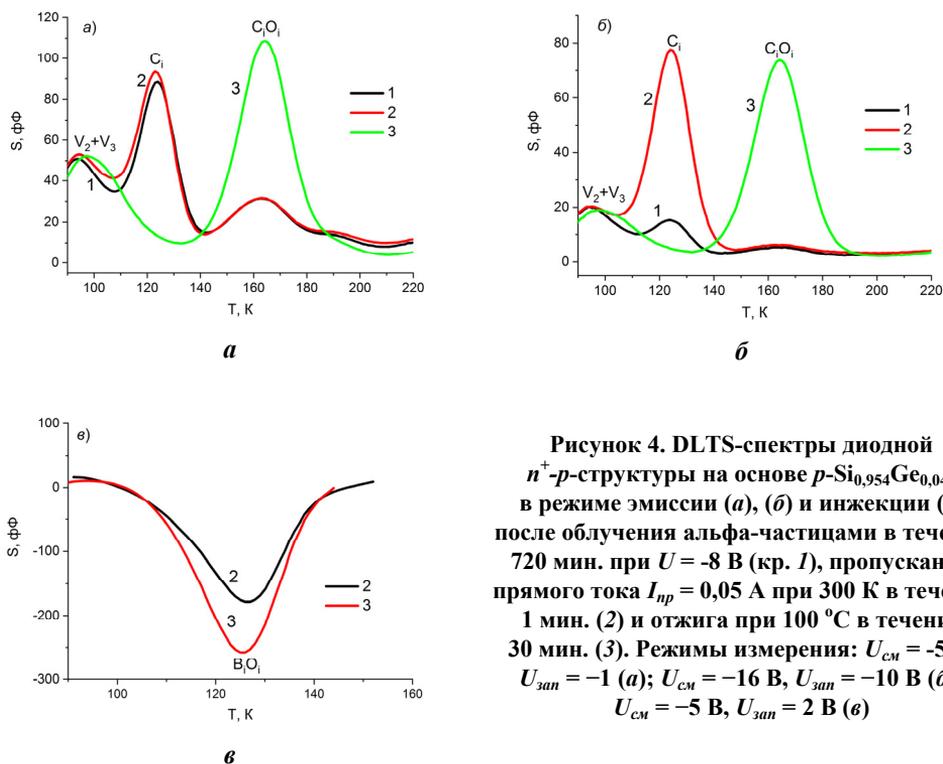


Рисунок 4. DLTS-спектры диодной n^+p -структуры на основе $p\text{-Si}_{0,954}\text{Ge}_{0,046}$ в режиме эмиссии (а), (б) и инжекции (в) после облучения альфа-частицами в течение 720 мин. при $U = -8$ В (кр. 1), пропускания прямого тока $I_{np} = 0,05$ А при 300 К в течение 1 мин. (2) и отжига при 100 °С в течение 30 мин. (3). Режимы измерения: $U_{см} = -5$ В, $U_{зан} = -1$ (а); $U_{см} = -16$ В, $U_{зан} = -10$ В (б); $U_{см} = -5$ В, $U_{зан} = 2$ В (в)

Сравнение результатов на рис. 3, б и 4, б показывает, что для обоих режимов облучения образцов спектры практически совпадают вне ОПЗ после всех обработок как по виду, так и по амплитудам пиков. Что же касается ОПЗ (рис. 3, а и 4, а), то здесь амплитуды пиков дефектов V_2 , C_i и C_iO_i практически одинаковы только после инжекционной и термической обработок. Однако сразу после облучения на спектрах, записанных в режиме перезарядки ловушек дырками, образца, облучаемого без смещения, практически отсутствуют пики ловушек междуузельного типа. Сравнение спектров, записанных в режиме инжекции (рис. 3, в и 4, в), показывает, что амплитуды пика ловушки B_iO_i после всех обработок в 1,4 раза меньше у облученного под обратным смещением образца по сравнению с облученным без смещения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено облучение альфа-частицами диодных n^+p -структур на $p\text{-Si}_{0,954}\text{Ge}_{0,046}$ с удельным сопротивлением 3–4 Ом·см в режимах обратных смещений ($U_{см} = -8 \div -16$ В) и без смещения, при температуре 293 К. Из анализа вольтфарадных характеристик показано, что у образцов облучаемых в режиме обратных смещений на профилях концентрации подвижных носителей заряда $p(x)$ возникают участки не монотонности, совпадающие с границей области пространственного заряда.

Методом *DLTS*-спектроскопии показано, что различие в скорости удаления дырок в ОПЗ и квазинейтральной части базы в процессе облучения альфа частицами при обратном смещении n^+p -структур на основе $p\text{-Si}_{0,954}\text{Ge}_{0,046}$ связано с инжекционно-стимулированной миграцией собственных междоузельных атомов кремния Si_i^{++} и их взаимодействием с другими дефектами решетки в ОПЗ при облучении. Такие же особенности наблюдались ранее в облученных n^+p -диодах на основе $p\text{-Si}$ без примеси германия [1–3].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Кучинский, П.В. Инжекционная, электрополевая и термическая перестройка радиационных дефектов в p -кремнии / П.В. Кучинский, В.М. Ломако, А.П. Петрунин // ФТП. - 1989. – Т. 23, № 9. – С. 1625–742.
2. Огородников, Д.А. Влияние электрического поля на образование радиационно-индуцированных центров в кремнии p -типа при облучении α -частицами / Д.А. Огородников и др. // Труды 29-ой Междунар. конф. «Радиационная физика твердого тела» (Севастополь, 8–13 июля 2019 г.), под ред. Бондаренко Г.Г. - Москва, 2019. С. 160-169.
3. Aharodnikau, D.A. The role of Si self-interstitial atoms in the formation of electrically active defects in reverse-biased silicon n^+p diodes upon irradiation with alpha particles / D.A. Aharodnikau [et al.] / *Physica Status Solidi A*. – 2021. – <https://doi.org/10.1002/pssa.202100104>.

ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ОТРИЦАТЕЛЬНО ЗАРЯЖЕННЫХ ВАКАНСИЙ В АЛМАЗЕ

Н. М. Казючиц¹, В. Н. Казючиц¹, М. С. Русецкий¹,
А. В. Мазаник¹, В. А. Скуратов², А. М. Зайцев^{3,4}

¹⁾ *Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь,
e-mail: kazuchits@bsu.by*

²⁾ *Объединенный институт ядерных исследований, ул. Жолио-Кюри 6, 141980 Дубна, Россия
e-mail: skuratov@jinr.ru*

³⁾ *The College of Staten Island / CUNY, 2800 Victory Blvd., Staten Island, NY 10312, USA
e-mail: alexander.zaitsev@csi.cuny.edu*

⁴⁾ *Gemological Institute of America, 50 W 47th St #800, New York, NY 10036, USA*

Обнаружена фотолюминесценция (ФЛ) в алмазе, связанная с отрицательно заряженными вакансиями – $ND1$ -центром. Излучение $ND1$ -центра состоит из узкой бесфононной линии (БФЛ) на длине волны 393.5 нм (3.150 эВ) и серии линий фононных повторений с энергией квазилокальных колебаний 76 мэВ. Интенсивность ФЛ $ND1$ -центра линейно связана с флюенсом облучения алмаза высокоэнергетическими ионами Хе и электронами. Спектры ФЛ и поглощения $ND1$ -центра являются зеркально симметричными. Энергии квазилокальных колебаний $ND1$ -центра одинаковы как для люминесценции, так и для поглощения.

Ключевые слова: алмаз; облучение; $ND1$ -центр; фотолюминесценция; электронно-колебательное взаимодействие.