

УДК 621.315.592

# Немонотонные изменения концентрации радиационных дефектов донорного и акцепторного типов в кремнии, индуцируемые потоками $\beta$ -частиц малой интенсивности

© М.В. Бадылевич<sup>+</sup>, И.В. Блохин<sup>+</sup>, Ю.И. Головин<sup>\*</sup>, А.А. Дмитриевский<sup>\*†</sup>,  
С.В. Карцев<sup>\*</sup>, Н.Ю. Сучкова<sup>\*</sup>, М.Ю. Толотаев<sup>\*</sup>

<sup>+</sup> Институт физики твердого тела Российской академии наук,  
142432 Черногловка, Россия

<sup>\*</sup> Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина,  
392622 Тамбов Россия

(Получена 11 января 2006 г. Принята к печати 6 апреля 2006 г.)

Методом нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней исследована зависимость концентрации радиационных дефектов донорного и акцепторного типов от времени облучения потоками  $\beta$ -частиц малой интенсивности ( $I \approx 9 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ). Обнаружены немонотонные изменения концентраций дефектов  $C_i$ ,  $C_i-C_s$  и (или)  $V-O$  для кристаллов  $n$ -типа проводимости, а также  $V-B$ ,  $C_i-O_i$  и (или)  $V_2-O-C$  для кристаллов  $p$ -типа.

PACS: 61.72.Ji, 61.72.Ss, 61.80.Fe

## 1. Введение

К настоящему времени структура большинства электрически активных радиационных дефектов (РД) полупроводников надежно установлена [1]. Описаны модели квазихимических реакций, продуктами которых являются многокомпонентные комплексы вторичных РД [2]. В подавляющем большинстве исследований РД интенсивность облучения варьировалась в интервале от  $10^{13}$  до  $10^{18} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . В таких условиях физические свойства, как правило, меняются монотонно с нарастанием флюенса. Обнаруженное в [3] немонотонное изменение микротвердости кремния, индуцируемое потоками  $\beta$ -частиц малой интенсивности ( $I = 10^5 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ), не удается объяснить, используя механизмы, описывающие взаимодействие заряженных частиц с веществом при умеренных и больших дозах облучения. В [4] было установлено, что процесс преобразования подсистемы РД кремния, индуцируемый  $\beta$ -облучением малой интенсивности, является многостадийным. Методами изохронного отжига образцов на разных стадиях облучения и исследования скорости изменения микротвердости в зависимости от интенсивности облучения показано, что первый из двух наблюдаемых пиков разупорядочения (на зависимости микротвердости от времени облучения) связан с накоплением комплексов радиационных дефектов, включающих две вакансии ( $V_2-O_2$  и (или)  $V_2-O-C$ ). За появление второго пика разупорядочения отвечают комплексы радиационных дефектов  $V-O$  (А-центры) и (или)  $C_i-O_i$  (индекс  $i$  обозначает межузельное положение атома в кристаллической решетке). Однако используемые в [3,4] подходы не дают

информации о кинетике изменения концентрации ( $N$ ) указанных дефектов. В связи с этим цель настоящей работы заключалась в исследовании изменений концентраций электрически активных дефектов в условиях  $\beta$ -облучения малой интенсивности.

## 2. Методика эксперимента

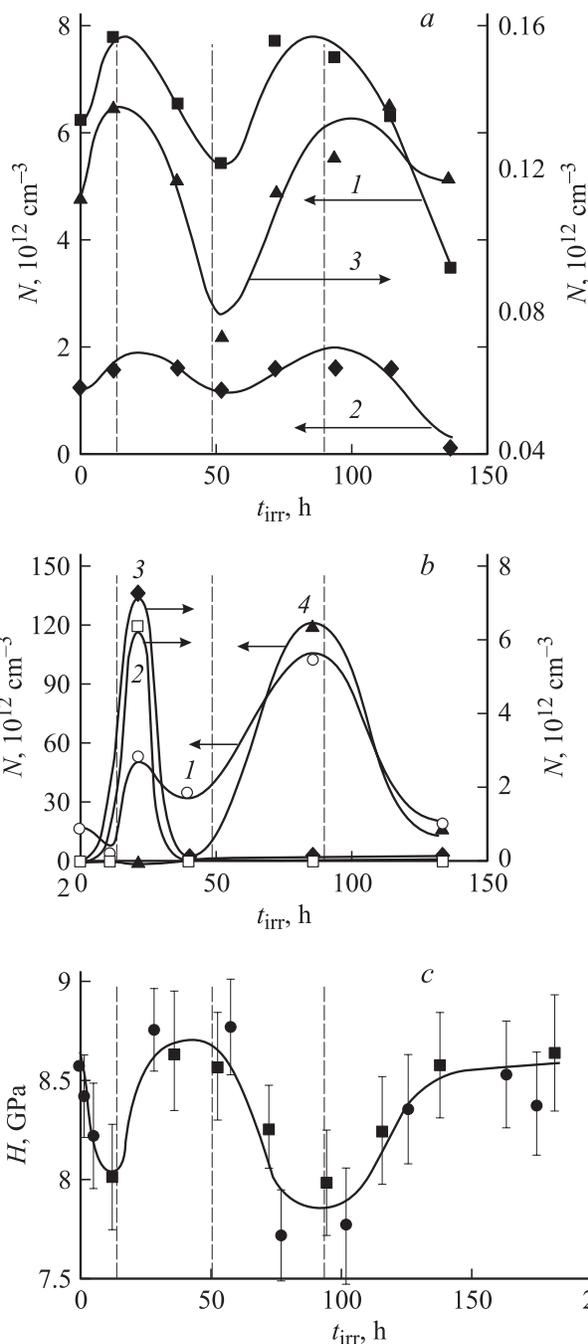
В экспериментах исследовались бездислокационные монокристаллические образцы кремния, выращенного методом Чохральского, ( $Cz-Si$ )  $n$ -типа, легированные фосфором (КЭФ-10), и  $p$ -типа, легированные бором (КДБ-10). Они имели форму пластин с линейными размерами  $1 \times 4 \times 7$  мм. Поверхность с максимальной площадью совпадала с плоскостью (111). Для облучения образцов использовался радиоактивный источник  $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$  с активностью  $A = 14.5$  МБк. Средняя энергия эмиттируемых электронов составляла 0.20 МэВ для  $^{90}\text{Sr}$  и 0.93 МэВ для  $^{90}\text{Y}$ . Интенсивность потока рассчитывалась посредством компьютерного моделирования с учетом геометрии источника и образца и имела во всех опытах значение  $I = 9 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Флюенс при максимальной экспозиции образцов в поле  $\beta$ -частиц не превышал значения  $5.6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ . Облучение проводилось на воздухе при комнатной температуре. Для контроля состояния глубоких уровней измерялись спектры DLTS [5]. Для этого на поверхности (111) каждого образца был сформирован диод Шоттки путем напыления слоя золота (для образцов  $n$ -типа) или алюминия (для образцов  $p$ -типа) толщиной 2–3 мкм в вакууме не хуже  $10^{-5}$  мбар. Для снятия спектров DLTS образцы периодически извлекались из камеры, в которой происходило облучение.

<sup>†</sup> E-mail: dmitr2002@tsu.tmb.ru

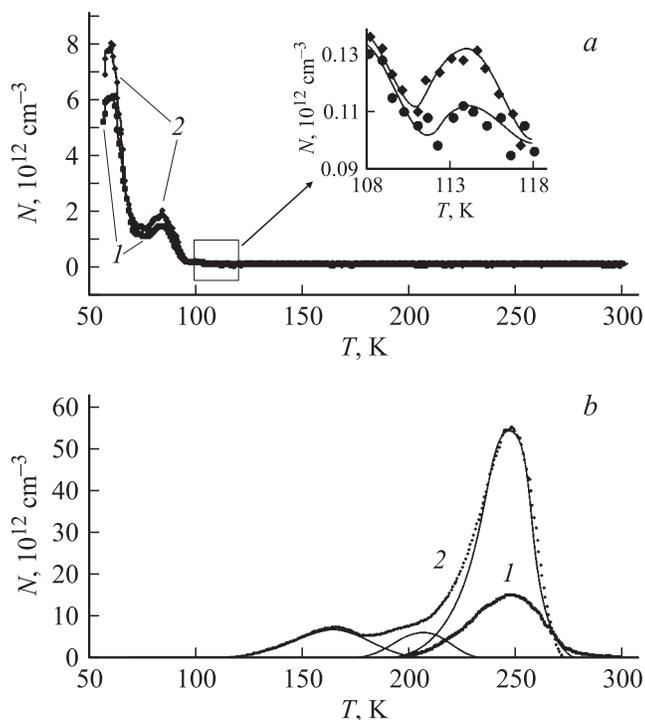
### 3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Показано, что облучение потоками  $\beta$ -частиц малой интенсивности ( $I = 9 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ) индуцирует преобразование подсистемы электрически активных радиационных дефектов (РД). Радиационно-стимулированное изменение спектров DLTS образцов  $n$ - и  $p$ -типа проводимости представлено на рис. 1, *a* и *b* соответственно. Видно, что при облучении образцов  $n$ -типа проводимости изменяется концентрация акцепторных комплексов с энергиями  $E_c - 0.11 \text{ эВ}$ ,  $E_c - 0.13 \text{ эВ}$  и  $E_c - 0.18 \text{ эВ}$  (рис. 1, *a*). Облучение образцов  $p$ -типа проводимости приводит к изменению концентрации донорных комплексов с энергией  $E_v + 0.43 \text{ эВ}$ , а также к появлению РД с энергетическими уровнями  $E_v + 0.24 \text{ эВ}$ ,  $E_v + 0.36 \text{ эВ}$  и  $E_v + 0.53 \text{ эВ}$  (рис. 1, *b*). Обнаружено, что изменения концентрации описанных РД (как акцепторного, так и донорного типов), индуцируемые  $\beta$ -облучением, ( $I = 9 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ), немонотонны во времени (рис. 2, *a, b*).

Дефекты с энергетическими уровнями  $E_c - 0.11 \text{ эВ}$  и  $E_c - 0.18 \text{ эВ}$  можно идентифицировать как межузельный углерод  $C_i$  и А-центр и (или) комплекс  $C_i - C_s$  соответственно [6] (индекс  $s$  обозначает положение атома в узле кристаллической решетки). Акцепторный уровень  $E_c - 0.13 \text{ эВ}$  обычно связывают с межузельным бором [7], парой Fe-Al [8] или водородсодержащим



**Рис. 2.** Зависимость изменения концентрации  $N$  радиационных дефектов акцепторного типа (*a*), донорного типа (*b*) и микротвердости кремния  $H$  (*c*) от времени  $\beta$ -облучения  $t_{\text{irr}}$  с интенсивностью  $I = 9 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . *a*: 1 — ( $E_c - 0.11 \text{ эВ}$ ), 2 — ( $E_c - 0.13 \text{ эВ}$ ), 3 — ( $E_c - 0.18 \text{ эВ}$ ). *b*: 1 — ( $E_v + 0.43 \text{ эВ}$ ), 2 — ( $E_v + 0.24 \text{ эВ}$ ), 3 — ( $E_v + 0.36 \text{ эВ}$ ), 4 — ( $E_v + 0.53 \text{ эВ}$ ).



**Рис. 1.** Спектры DLTS кремния  $n$ - (*a*) и  $p$ -типа (*b*). *a*: 1 — исходные, 2 — после  $\beta$ -облучения с интенсивностью  $I = 9 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  в течение 22 ч. *b*: показано разложение спектра 2 на составляющие.

комплексом в облученном протонами кремнии [9]. Используемые в работе образцы (КЭФ-10) и тип облучения исключают возможность появления указанных радиационных дефектов в достаточном для их регистрации количестве. В связи с этим авторы затрудняются надежно идентифицировать уровень  $E_c - 0.13 \text{ эВ}$ .

Энергетический уровень  $E_v + 0.24$  эВ можно отождествить с межузельным атомом алюминия или с парой  $Al_i - Al_s$  [6]. Появление дефектов этого типа могло являться результатом радиационно-стимулированной диффузии атомов алюминия с поверхности образца (диод Шоттки для образцов  $p$ -типа формировался напылением алюминия). Это явление, на наш взгляд, является лишь методической особенностью эксперимента. На этом основании при рассмотрении процесса преобразования подсистемы структурных дефектов, индуцируемого облучением малой интенсивности, появление комплексов, включающих атомы алюминия, учитывать не следует. Комплексы с энергетическими уровнями  $E_v + 0.43$  эВ и  $E_v + 0.36$  эВ можно идентифицировать как  $V - B$  [6,10] и  $C_i - O_i$  [7] и (или)  $V_2 - O - C$  [10] соответственно. Глубокий уровень с энергией  $E_v + 0.53$  эВ связывают [8] с межузельным атомом железа (в зарядовом состоянии  $0/+$ ). Наличие в исследуемых образцах примеси железа в достаточном (для регистрации спектров DLTS) количестве маловероятно. Авторы затрудняются надежно идентифицировать наблюдаемые РД с энергией  $E_v + 0.53$  эВ.

Из рис. 2 видно, что зависимости концентраций РД  $N$  от времени облучения  $t_{irr}$  немонотонны и, кроме того, синфазны. Особый интерес вызывает тот факт, что уменьшение концентраций описанных выше РД не сопровождается появлением (увеличением концентрации) других типов электрически активных дефектов. Одним из возможных объяснений этого феномена, на наш взгляд, может являться существование элеткрически неактивных радиационных дефектов, концентрация которых под действием облучения изменяется в противофазе с концентрацией РД, наблюдаемых методом DLTS.

Настоящий эксперимент был поставлен таким образом, что параметры облучения и тип образцов были аналогичны использованным в [11]. Это позволяет проводить сравнение зависимостей концентрации электрически активных РД и микротвердости кремния ( $H$ ) от времени облучения  $t_{irr}$  (рис. 2). Увеличение концентрации РД с энергетическими уровнями  $E_c - 0.11$  эВ,  $E_c - 0.18$  эВ,  $E_v + 0.43$  эВ,  $E_v + 0.36$  эВ сопровождается разупорядочением кремния, последующее уменьшение концентрации указанных РД — промежуточным восстановлением микротвердости к исходному значению. Длительность облучения, при которой наблюдается максимальная концентрация РД с энергетическими уровнями  $E_c - 0.11$  эВ,  $E_c - 0.18$  эВ,  $E_v + 0.43$  эВ,  $E_v + 0.53$  эВ, соответствует повторному пику разупорядочения (минимуму микротвердости).

Необходимо отметить, что концентрация РД с энергетическим уровнем  $E_v + 0.36$  эВ, который можно идентифицировать как  $V_2 - O - C$ , имеет максимум в интервале времен облучения от 10 до 40 ч при  $I = 9 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Это подтверждает предположение авторов [4] о связи первого пика разупорядочения с комплексами РД, в состав которых входят 2 вакансии.

## 4. Заключение

Таким образом, обнаружено немонотонное изменение концентрации ряда РД донорного и акцепторного типов, индуцируемое  $\beta$ -облучением малой интенсивности. Показано, что концентрация электрически активных РД и микротвердость кремния изменяются противофазно.

Авторы выражают благодарность Ю.Л. Иунину за предоставленные образцы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 05-02-17730), а также программы ФЦНТП (проект РИ-111/001/064).

## Список литературы

- [1] В.С. Вавилов, В.Ф. Киселев, Б.Н. Мукашев. *Дефекты в кремнии и на его поверхности* (М., Наука 1990).
- [2] B.G. Svensson, J.L. Lindstrom. *J. Appl. Phys.*, **72**, 5616 (1992).
- [3] Ю.И. Головин, А.А. Дмитриевский, И.А. Пушкин, Н.Ю. Сучкова. *ФТТ*, **46**, 1790 (2004).
- [4] Ю.И. Головин, А.А. Дмитриевский, Н.Ю. Сучкова. *ФТТ*, **48**, 262 (2006).
- [5] D.V. Lang. *J. Appl. Phys.*, **45**, 3023 (1974).
- [6] В.С. Вавилов, Н.П. Кекелидзе, Л.С. Смирнов. *Действие излучений на полупроводники* (М., Наука, 1998).
- [7] B.G. Svensson. *EMIS Datareviews*. Ser. № 20 (1998) p. 763.
- [8] A.A. Istratov, H. Hieslmair, E.R. Weber. *Appl. Phys. A*, **69**, 13 (1999).
- [9] K. Irmscher, H. Klose, L. Maass. *J. Phys. C*, **17**, 6317 (1984).
- [10] Т.А. Пагава. *ФТП*, **38**, 665 (2004).
- [11] Ю.И. Головин, А.А. Дмитриевский, Н.Ю. Сучкова, М.В. Бадыевич. *ФТТ*, **47**, 1237 (2005).

Редактор Л.В. Шаронова

## Nonmonotonic changes of radiation defects concentrations of donor and acceptor types in silicium induced by a low-intensity beta-irradiation

*M.V. Badylevich, I.V. Blokhin, Yu.I. Golovin\*, A.A. Dmitrievskii\*, S.V. Kartsev\*, N.Yu. Suchkova\*, M.Yu. Tolotayev\**

Institute of Solid State Physics,  
Russian Academy of Sciences,  
142432 Chernogolovka, Russia

\* G.R. Derzhavin Tambov State University,  
392622 Tambov, Russia

**Abstract** The dependence of concentrations of radiation-induced donor and acceptor types of defects on the duration of a low-intensity ( $I \approx 9 \times 10^5 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) beta-irradiation is studied by method of deep level transient spectroscopy (DLTS). Nonmonotonic changes of concentration of defects  $C_i$ ,  $C_i - C_s$  and/or  $V - O$ , and also  $V - B$  and  $C_i - O_i$  and/or  $V_2 - O - C$  for the crystals of  $n$ - and  $p$ -types accordingly are found out.