

## Радиационно-индуцированные бистабильные центры с глубокими уровнями в кремниевых $n^+ - p$ -структурах

© С.Б. Ластовский\*, В.П. Маркевич+, А.С. Якушевич\*, Л.И. Муринов\*, В.П. Крылов\*

\* Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению, 220072 Минск, Республика Беларусь

+ Университет г. Манчестер, M13 9PL Манчестер, Англия

• Владимирский государственный университет, 600000 Владимир, Россия

E-mail: lastov@ifftp.bas-net.by

(Получена 1 декабря 2015 г. Принята к печати 8 декабря 2015 г.)

Методом нестационарной спектроскопии глубоких уровней (DLTS) исследованы электрически активные дефекты в кристаллах кремния  $p$ -типа, облученных быстрыми электронами и  $\alpha$ -частицами. Обнаружен и исследован новый радиационно-индуцированный дефект, обладающий свойствами бистабильных центров. После длительного хранения облученных образцов при комнатной температуре либо их кратковременного отжига при  $T \sim 370$  К дефект не проявляет электрической активности в кремнии  $p$ -типа. Однако в результате последующей инжекции неосновных носителей заряда данный центр переходит в метастабильную конфигурацию с глубокими уровнями у  $E_V + 0.45$  эВ и  $E_V + 0.54$  эВ. Обратный переход в основную конфигурацию имеет место в диапазоне температур  $50 - 100^\circ\text{C}$  и характеризуется энергией активации  $\sim 1.25$  эВ и частотным фактором  $\sim 5 \cdot 10^{15} \text{c}^{-1}$ . Обнаруженный дефект термически стабилен до  $T \sim 450$  К. Предполагается, что данный дефект может быть либо комплексом собственный межузельный атом кремния—межузельный атом углерода, либо комплексом собственный межузельный атом кремния—межузельный атом бора.

### 1. Введение

Бистабильными принято считать дефекты, для которых существуют две устойчивые конфигурации в решетке полупроводника. Как правило, в равновесных условиях в зависимости от положения уровня Ферми одна из конфигураций является энергетически более выгодной и основной [1–3]. При изменении зарядового состояния центра вследствие захвата неравновесных (неосновных) носителей заряда возможен переход во вторую (метастабильную) конфигурацию [4,5]. Обычно конфигурации разделены энергетическим барьером, что позволяет создавать и сохранять в течение длительного времени неравновесную заселенность метастабильного состояния даже в области комнатных температур. С повышением температуры, как правило, имеет место термически активируемый обратный переход из метастабильной в основную конфигурацию. При этом в области термической стабильности дефекта возможны многократные обратимые конфигурационные трансформации [1–6]. Так как электронные свойства дефекта в различных конфигурациях могут быть существенно различными, то, изменяя заселенность состояний, можно влиять на электрические и оптические свойства полупроводника. Очевидно, что при изменении конфигурации дефекта в решетке в результате инжекции неосновных носителей заряда могут существенно измениться и параметры полупроводниковых приборов [6]. В связи с этим возникает необходимость проведения детальных исследований природы и электронных свойств бистабильных дефектов в кремнии, который продолжает оставаться базовым материалом современной микроэлектроники.

Поскольку в технологии изготовления быстродействующих кремниевых приборов широко используются радиационные методы [7], то значительный интерес представляет и исследование бистабильных радиационно-индуцированных центров в  $p - n$ -структурах на основе кремния.

К настоящему времени накоплен большой экспериментальный материал по свойствам радиационно-индуцированных центров (РИЦ) в кремнии, для ряда РИЦ определены параметры, выяснены механизмы образования и отжига некоторых центров. В то же время имеющаяся информация о бистабильных РИЦ в Si весьма ограничена. Достаточно хорошо изучены электронные свойства только таких центров как вакансии, межузельный атом бора и комплекс межузельный углерод—узловой углерод [1–3]. Недавно была обнаружена бистабильность такого технологически важного дефекта как тривакансия и определены ее электронные характеристики в различных конфигурациях [8–10]. В другой нашей недавно опубликованной работе [11] сообщается об обнаружении в кремнии еще одного бистабильного радиационно-индуцированного центра (БРИЦ) с глубокими уровнями вблизи середины запрещенной зоны. В настоящей работе приведены результаты дальнейших исследований данного дефекта.

### 2. Методика эксперимента

Исследуемые образцы изготавливались на эпитаксиальном кремнии  $p$ -типа (легирующая примесь — бор с концентрацией  $N_B \approx 5 \cdot 10^{14} \text{см}^{-3}$ ), выращенном на пла-

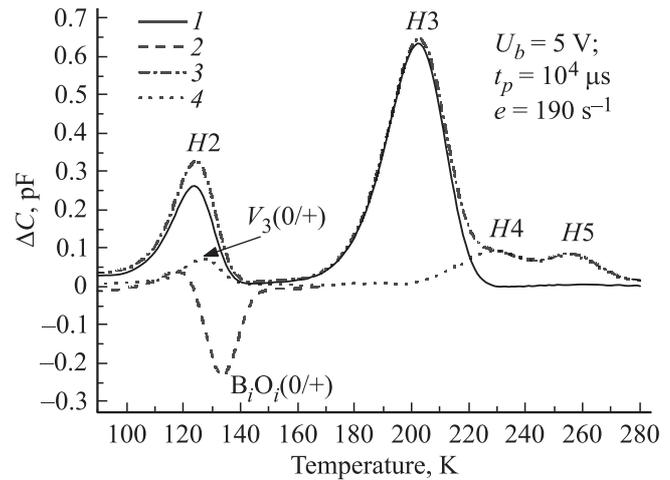
стинах сильно легированного  $p$ -Si ( $\rho \approx 0.005 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ), полученных методом Чохральского. Толщина эпитаксиального слоя составляла около 33 мкм. Для формирования  $p$ - $n$ -перехода фосфор имплантировался в  $p$ -базу с последующим отжигом при 1420 К в атмосфере азота и кислорода. Глубина залегания  $p$ - $n$ -перехода составляла 8–9 мкм, площадь —  $9 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$  ( $2.8 \times 3.2 \text{ мм}^2$ ). В качестве омических контактов напылялся слой алюминия толщиной 4.5 мкм.

Облучение  $n^+$ - $p$ -структур осуществлялось  $\alpha$ -частицами с помощью источника с изотопами  $\text{Pu}^{239}$  (энергия  $\alpha$ -частиц составляла 5.144 и 5.157 МэВ) в течение 300 мин. Поверхностная активность источника была около  $2 \cdot 10^8 \text{ Бк/см}^2$ . Температура образцов в процессе облучения не превышала 290 К. Часть образцов облучалась также  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  и быстрыми электронами с энергией 4–6 МэВ при комнатной температуре и при  $T = 80 \text{ К}$ . Отжиг облученных образцов в диапазоне температур 273–398 К проводился в DLTS-спектрометре, а при более высоких температурах отжига — в термостате в атмосфере азота либо на воздухе.

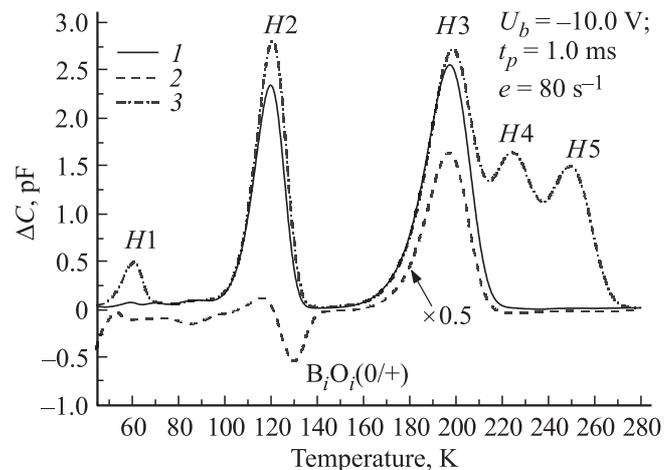
Определение концентрации и электронных характеристик РИЦ (энергии активации эмиссии и сечения захвата носителей заряда) в базовой области  $n^+$ - $p$ -структур осуществлялось методами нестационарной спектроскопии глубоких уровней (DLTS) и Лаплас-DLTS-спектроскопии с высоким разрешением (LDLTS) [12]. Спектры измерялись в диапазонах температур 77–400 К (DLTS) и 40–300 К (LDLTS) в режимах заполнения ловушек как основными, так и неосновными носителями заряда.

### 3. Экспериментальные результаты и обсуждение

На рис. 1 и 2 показаны типичные DLTS-спектры для  $n^+$ - $p$ -диодов, которые были облучены  $\alpha$ -частицами (рис. 1) в течение 300 мин при  $T = 290 \text{ К}$  и быстрыми электронами (рис. 2) с энергией 6 МэВ при  $T = 80 \text{ К}$  ( $\Phi = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ ). Образец, облученный электронами, был подвергнут 15-минутному изохронному отжигу в диапазоне температур 125–375 К с шагом 25 К. Образец, облученный  $\alpha$ -частицами, был отожжен при  $100^\circ\text{C}$  в течение 30 мин. Термообработка при 373 К использовалась для удаления из спектров нескольких незначительных по амплитуде DLTS-пигов, связанных с дырочными ловушками, которые нестабильны при температурах, незначительно превышающих 300 К, и их исследование не относится к цели данной работы. Спектры 1 и 2 на рис. 1 и 2, измеренные в режимах заполнения ловушек основными и неосновными носителями заряда после отжига, характерны для DLTS-спектров кристаллов  $\text{Cz-Si:B}$ , облученных как быстрыми электронами, так и  $\alpha$ -частицами (см., например, [8,10,13] и ссылки в них). Для всех ловушек были определены электронные характеристики (энергия активации эмиссии для

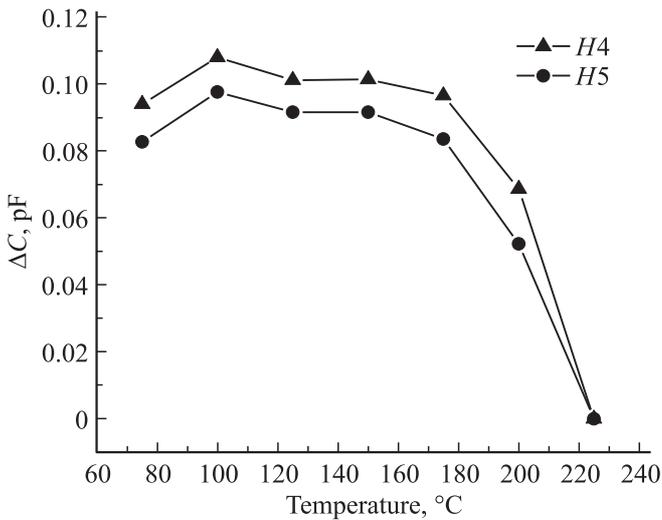


**Рис. 1.** Спектры DLTS эпитаксиальной  $n^+$ - $p$ -структуры, облученной  $\alpha$ -частицами при  $T = 290 \text{ К}$  и отожженной при  $100^\circ\text{C}$  в течение 30 мин (спектры 1 и 2) и после пропускания прямого тока плотностью  $4.8 \text{ А/см}^2$  в течение 1 мин при  $300 \text{ К}$  (3). Спектр 4 соответствует разности спектров 1 и 3. Спектры 1 и 3 измерялись в режиме перезарядки ловушек основными носителями заряда ( $U_p = 0 \text{ В}$ ), спектр 2 — неосновными носителями заряда ( $U_p = +2.0 \text{ В}$ ).



**Рис. 2.** Спектры DLTS эпитаксиальной  $n^+$ - $p$ -структуры, облученной электронами с  $E = 6 \text{ МэВ}$  при  $T = 80 \text{ К}$  и отожженной при  $375 \text{ К}$  в течение 30 мин (спектры 1 и 2) и после пропускания прямого тока  $16 \text{ А/см}^2$  в течение 3 мин при  $290 \text{ К}$  (3). Спектры 1 и 3 измерялись в режиме перезарядки ловушек основными носителями заряда ( $U_p = -1.0 \text{ В}$ ), спектр 2 — неосновными носителями заряда ( $U_b = -4.0 \text{ В}$ ;  $U_p = +2.0 \text{ В}$ ).

дырок (электронов) ( $E_{h(e)}$ ) и предэкспоненциальный фактор ( $\alpha$ ) из зависимостей Аррениуса скоростей эмиссии дырок (электронов), измеренных с использованием LDLTS. Сравнение полученных значений для дырочных ловушек H2 ( $E_h = 0.192 \text{ эВ}$ ,  $\alpha = 7.4 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1} \text{ К}^{-2}$ ) и H3 ( $E_h = 0.360 \text{ эВ}$ ,  $\alpha = 4.0 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1} \text{ К}^{-2}$ ) с известными ли-

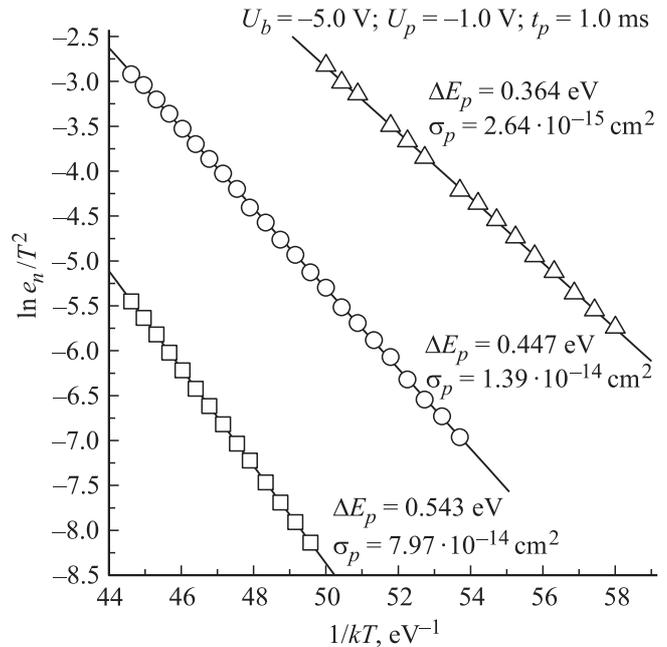


**Рис. 3.** Зависимости амплитуд DLTS-пигов *H4* и *H5*  $n^+ - p$ -структуры, облученной  $\alpha$ -частицами при  $T = 290$  К, от температуры изохронного (30 мин) отжига.

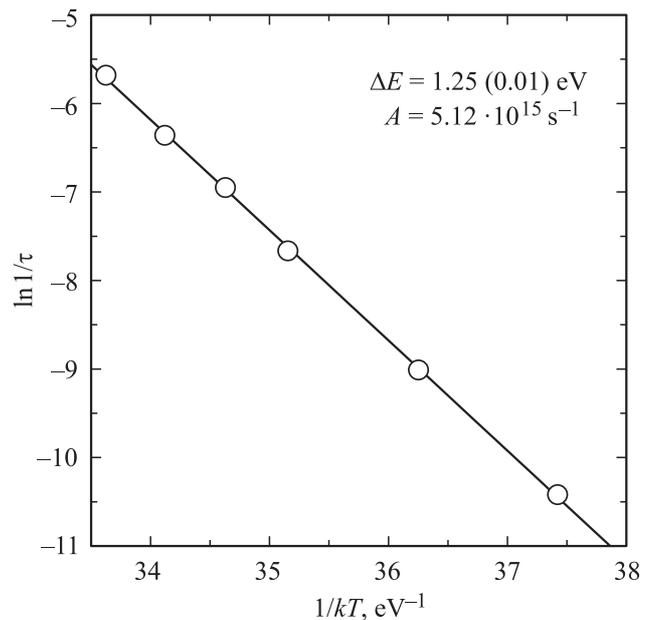
тературными данными для радиационных дефектов в кристаллах Cz-Si:В позволяет соотнести их с эмиссией дырок из однократно положительно заряженных состояний дивакансии ( $V_2$ ) и комплекса межузельный углерод–межузельный кислород ( $C_iO_i$ ) соответственно [8,10,13]. Спектры 2 получены в режиме перезарядки ловушек неосновными носителями заряда. На данных спектрах основной минимум наблюдается при 130 К. Электронные характеристики соответствующей ему ловушки равны  $E_e = 0.24$  эВ и  $\alpha = 1 \cdot 10^7 \text{ c}^{-1}\text{K}^{-2}$ . Данная ловушка, вероятнее всего, является комплексом межузельный бор–межузельный кислород ( $B_iO_i$ ) [8,9,13].

DLTS-спектры 3 на рис. 1 и 2 записаны после пропускания через диодные  $n^+ - p$ -структуры прямого тока. Как видно из представленных данных, инжекция неосновных носителей заряда в базовую  $p$ -область приводит к изменению вида DLTS-спектров: увеличению амплитуды пика *H2* и появлению трех дополнительных пиков *H1*, *H4* и *H5*. Наблюдаемое изменение спектра в области низких температур связано с трансформацией тривакансии  $V_3$  из четырехкратно-скоординированной конфигурации в метастабильную планарную (110) [8–10]. В связи с этим увеличение амплитуды пика при 125 К вызвано ростом амплитуды сигнала эмиссии дырок с уровня  $V_3(+/0)$ , который накладывается на сигнал эмиссии с уровня  $V_2(+/0)$ , что хорошо видно из спектра 4 на рис. 1, полученного вычитанием спектра 1 из 3. Появление на спектрах пиков *H4* и *H5* обусловлено эмиссией дырок с глубоких уровней ранее не наблюдававшихся радиационно-индуцированных центров. Поскольку оба пика ведут себя совершенно идентично в процессе как инжекционных, так и термических обработок (рис. 3), то очевидно, что они оба обусловлены эмиссией дырок с уровней одного и того же метастабильного дефекта. Уровни данного дефекта в электрически активной

конфигурации являются более глубокими, чем уровень комплекса  $C_iO_i$  и расположены вблизи середины запрещенной зоны у  $E_V + 0.45$  эВ и  $E_V + 0.54$  эВ (рис. 4). Проведенные изохронный и изотермические отжиги показали, что трансформация из электрически активной конфигурации в нейтральную имеет место в области



**Рис. 4.** Зависимости Аррениуса для скорости эмиссии дырок с донорного уровня комплекса  $C_iO_i$  и глубоких уровней бистабильного дефекта в кремнии  $p$ -типа.



**Рис. 5.** Температурная зависимость обратной величины характеристического времени трансформации метастабильного дефекта в электрически неактивное состояние.

температур 50–100°С и характеризуется энергией активации  $\sim 1.25$  эВ и частотным фактором  $\sim 5 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$  (рис. 5). Последующая инжекция неосновных носителей заряда в области комнатных температур переводит дефект опять в электрически активное состояние. Такие трансформации в результате термических и инжекционных обработок могут проводиться многократно без изменения концентрации дефекта, т.е. данный дефект является бистабильным центром. Обнаруженный БРИЦ отжигается в диапазоне температур 170–230°С (рис. 3), т.е. он обладает довольно высокой термической стабильностью.

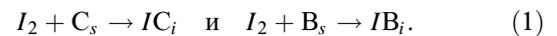
Некоторые характеристики обнаруженного нами бистабильного центра близки к таковым тривакансии [8–10]. Оба дефекта могут находиться по крайней мере в двух конфигурациях, характеризующихся различным спектром энергетических уровней. При этом для перехода из одной конфигурации в другую достаточно провести инжекцию неосновных носителей заряда в базовую  $p$ -область  $n^+p$ -структур. Обратный переход (из метастабильной в основную конфигурацию) имеет место в процессе термического отжига в диапазоне температур 320–370 К и характеризуется энергией активации  $\sim 1.2$ – $1.3$  эВ и значением частотного фактора  $\sim 10^{14}$ – $10^{15} \text{ с}^{-1}$  (рис. 5). Отжигаются оба центра в диапазоне температур 450–500 К.

В то же время имеется ряд существенных отличий как по конкретным характеристикам обоих центров (например, положение уровней в запрещенной зоне), так и по условиям их формирования и отжига, а также проявления электрической активности в той или иной конфигурации. Очевидно, что природа этих центров различна. Идентифицировать обнаруженный бистабильный дефект на основании полученных экспериментальных данных пока достаточно сложно. Однако совокупность уже имеющихся результатов и их сопоставление с литературными данными позволяют высказать предположения о возможной природе данного дефекта.

Наиболее вероятно, что этот радиационно-индуцированный центр является дефектом межузельного типа. Об этом свидетельствует заметное дообразование данного центра в диапазоне температур 330–370 К, в которой имеет место отжиг (диссоциация) комплексов собственного димеждоузлия Si–кислород  $I_2O_i$  [14–16]. Кроме того, в области температур отжига БРИЦ (при  $T \geq 480$  К) имеет место некоторое дообразование межузельных комплексов  $C_iO_i$ , при этом увеличения концентрации вакансионно-кислородных комплексов не наблюдается.

Эффективность образования БРИЦ существенно зависит от энергии бомбардирующих частиц: при облучении  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  концентрация БРИЦ не превышает 1–2% от концентрации комплексов  $C_iO_i$  и сравнима с концентрацией дивакансий (в пределах погрешности эксперимента). При облучении быстрыми электронами ( $E = 4$ – $6$  МэВ) и  $\alpha$ -частицами относительная эффективность образования обнаруженного бистабильного центра по сравнению с  $C_iO_i$  резко возрастает, особенно при

$T_{\text{ит}} = 80$  К. Это свидетельствует о том, что в формировании БРИЦ принимает участие не одиночный собственный межузельный атом кремния  $I$ , а более сложный собственный дефект. Поскольку значения концентрации БРИЦ (амплитуды соответствующих пиков в спектрах DLTS) обычно находятся между таковыми для тривакансии и дивакансии, то логично предположить, что таким дефектом могут быть собственные димеждоузлия Si ( $I_2$ ), эффективность образования которых как первичных дефектов, согласно экспериментальным данным и расчетам (см., например, [17] и ссылки там), находится именно в данной области. Согласно литературным данным [17–19], собственные димеждоузлия кремния обладают высокой миграционной способностью как единое целое и могут взаимодействовать с другими дефектами и примесями даже при температурах существенно ниже комнатной. Следует ожидать, что основными стоками для подвижных  $I_2$  в кремнии  $p$ -типа, как и для собственных межузельных атомов Si, являются межузельные атомы кислорода, а также примесные узловые атомы углерода ( $C_s$ ) и бора ( $B_s$ ). Как уже отмечалось выше, комплекс  $I_2O_i$  обладает относительно невысокой термической стабильностью и отжигается при  $T \approx 350$  К. При взаимодействии собственных межузельных димеров Si с атомами  $C_s$  и  $B_s$  будут идти реакции:



Достоверных данных об электронных свойствах и термической стабильности комплекса собственный межузельный атом кремния–межузельный атом бора  $IB_i$  в литературе нет. Весьма вероятно, что обнаруженный нами в кремнии  $p$ -типа метастабильный дефект с уровнями у  $E_V + 0.45$  эВ и  $E_V + 0.54$  эВ является комплексом собственный межузельный атом кремния–межузельный атом углерода  $IC_i$ .

Во-первых, примесные атомы углерода присутствуют в значительных концентрациях практически во всех кристаллах кремния и вероятность образования этого комплекса весьма высока (как и вероятность образования межузельных атомов углерода  $C_i$ ), во-вторых, термическая стабильность БРИЦ и комплекса  $IC_i$  [20] совпадают. В то же время нельзя исключать, что данный бистабильный центр является комплексом  $IB_i$ .

Для окончательной идентификации обнаруженного БРИЦ требуется проведение как ряда дополнительных экспериментальных исследований, в том числе на кристаллах с различным относительным содержанием примесных атомов бора и углерода, облученных различными дозами быстрых электронов и/или  $\alpha$ -частиц при различных температурах и т.д., так и теоретических исследований структуры и электронных характеристик комплексов  $IC_i$  и  $IB_i$ . Если высказанная нами гипотеза о природе данного центра подтвердится, то в результате проведенных исследований будет получена важная информация о характеристиках такого фундаментального дефекта в кремнии, как собственный межузельный димер.

## 4. Заключение

Методом DLTS-спектроскопии в базовой  $p$ -области кремниевых диодных  $n^+ - p$ -структур, облученных высокоэнергетическими частицами, обнаружен и исследован новый радиационно-индуцированный дефект, обладающий свойствами бистабильных центров. После длительного хранения облученных образцов при комнатной температуре либо их кратковременного отжига при  $T \approx 370$  К дефект не проявляет электрической активности в кремнии  $p$ -типа. В результате инъекции неосновных носителей заряда данный центр переходит в метастабильную конфигурацию с глубокими уровнями около  $E_V + 0.45$  эВ и  $E_V + 0.54$  эВ. Обратный переход в основную конфигурацию имеет место в области температур 50–100°C и характеризуется энергией активации  $\sim 1.25$  эВ и частотным фактором  $\sim 5 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$ . Обнаруженный дефект термически стабилен до  $T \approx 450$  К. Предполагается, что данный дефект может быть либо комплексом собственный межузельный атом кремния–межузельный атом углерода  $IC_i$ , либо комплексом собственный межузельный атом кремния–межузельный атом бора  $IB_i$ .

В статье использованы материалы, полученные при финансовой поддержке Министерства Образования и науки России по Соглашению № 14.574.21.0132 о предоставлении субсидии на выполнение проекта RFMEFI57414X0132.

## Список литературы

- [1] A. Chantre. Appl. Phys. A, **48**, 3 (1989).
- [2] G.D. Watkins. Mater. Sci. Forum, **38-41**, 39(1989).
- [3] Б.Н. Мукашев, Х.А. Абдуллин, Ю.В. Горелкинский. УФН, **43**, 143 (2000).
- [4] L.F. Makarenko, L.I. Murin. Phys. Status Solidi B, **145** (1), 241 (1988).
- [5] G.D. Watkins. Rev. Sol. St. Science, **4** (3–4), 279 (1990).
- [6] R.M. Fleming, C.H. Seager, D.V. Lang, E. Bielejec, J.M. Campbell. Appl. Phys. Lett., **90**, 172 (2007).
- [7] Ф.П. Коршунов, Ю.В. Богатырев. Изв. НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук, **4**, 106 (2008).
- [8] V.P. Markevich, A.R. Peaker, B. Hamilton, S.B. Lastovskii, L.I. Murin, J. Coutinho, V.J.B. Torres, L. Dobaczewski, B.G. Svensson. Phys. Status Solidi A, **208** (3), 568 (2011).
- [9] J. Coutinho, V.P. Markevich, A.R. Peaker, Hamilton B., S.B. Lastovskii, L.I. Murin, B.J. Svensson, M.J. Rayson, P.R. Briddon. Phys. Rev. B, **86**, 174 101 (2012).
- [10] V.P. Markevich, A.R. Peaker, B. Hamilton, S.B. Lastovskii, L.I. Murin, J. Coutinho, M.J. Rayson, P.R. Briddon, B.G. Svensson. Sol. St. Phenomena, **205–206**, 181 (2014).
- [11] С.Б. Ластовский, В.П. Маркевич, А.С. Якушевич, Ф.П. Коршунов, Л.И. Мурин, Л.Ф. Макаренко. Докл. НАН Беларуси, **59** (4), 57 (2015).
- [12] L. Dobaczewski, A.R. Peaker, B.K. Nielsen. J. Appl. Phys., **96**, 4689 (2004).
- [13] L.F. Makarenko, S.B. Lastovskii, H.S. Yakushevich, M. Moll, I. Pintilie. Phys. Status Solidi A, **211** (11), 2558 (2014).
- [14] J. Hermansson, L.I. Murin, T. Hallberg, V.P. Markevich, J.L. Lindström, M. Kleverman, B.G. Svensson. Physica B: Condens. Matter, **302–303**, 188 (2001).
- [15] L.I. Khirunenko, L.I. Murin, J.L. Lindstrom, M.G. Sosnin, Yu.V. Pomozov. Physica B: Condens. Matter, **308–310**, 458 (2001).
- [16] V.P. Markevich, A.R. Peaker, B. Hamilton, V.E. Gusakov, S.B. Lastovskii, L.I. Murin, N. Ganagona, E.V. Monakhov, B.G. Svensson. Sol. St. Phenomena, **242**, 290 (2016).
- [17] G. Davies, S. Hayama, L. Murin, R. Krause-Rehberg, V. Bondarenko, A. Sengupta, C. Davia, A. Karpenko. Phys. Rev. B, **73**, 165 202 (2006).
- [18] R. Jones, T.A.G. Eberlein, N. Pinho, B.J. Coomer, J.P. Goss, P.R. Briddon, S. Öberg. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B, **186**, 10 (2002).
- [19] M. Posselt, F. Gao, D. Zwicker. Phys. Rev. B, **71**, 245 202 (2005).
- [20] L.I. Murin, J.L. Lindström, G. Davies, V.P. Markevich. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B, **253**, 210 (2006).

Редактор А.Н. Смирнов

## Bistable radiation-induced centers with deep levels in silicon $n^+ - p$ -structures

S.B. Lastovskii\*, V.P. Markevich<sup>+</sup>, H.S. Yakushevich\*, L.I. Murin\*, V.P. Krylov<sup>•</sup>

\* Scientific-Practical Materials Research Centre of National Academy of Sciences of Belarus, 220072 Minsk, Belarus  
<sup>+</sup> Photon Science Institute, The University of Manchester, M13 9PL Manchester, UK  
<sup>•</sup> Vladimir State University, 600000 Vladimir, Russia

**Abstract** Deep level transient spectroscopy has been used for studying electrically active defects in  $p$ -type silicon crystals irradiated with MeV electrons and  $\alpha$ -particles. A new radiation-induced defect possessing the properties of bistable centers has been revealed and investigated. The center does not display any electrical activity in  $p$ -Si after post-irradiation long-time keeping at room temperature or short-time annealing at about 370 K. However, after the following injection of minority carriers it is transformed into a metastable configuration with the deep energy levels at about  $E_V + 0.45$  eV and  $E_V + 0.54$  eV. A back transition into the main configuration occurs in the temperature range 50–100°C and is characterized by an activation energy of about 1.25 eV and frequency factor  $\sim 5 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1}$ . The defect is thermally stable up to about 450 K. It is suggested that the observed bistable center can be identified as a complex consisting of the Si self-interstitial–interstitial carbon or Si self-interstitial–interstitial boron atoms.