

ISSN 1561-2430 (Print)

ISSN 2524-2415 (Online)

УДК 537.312.5

<https://doi.org/10.29235/1561-2430-2018-54-2-220-228>

Поступила в редакцию 01.03.2018

Received 01.03.2018

Л. Ф. Макаренко¹, С. Б. Ластовский², Э. Гаубас³, Е. Павлов³,
М. Молл⁴, А. С. Якушевич², Л. И. Мурин²

¹Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь²Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси
по материаловедению, Минск, Беларусь³Институт фотоники и нанотехнологии, Вильнюс, Литва⁴ЦЕРН, Женева, Швейцария

ИНЖЕКЦИОННЫЙ ОТЖИГ КОМПЛЕКСА СОБСТВЕННОЕ ДИМЕЖДОУЗЛИЕ – КИСЛОРОД В КРЕМНИИ *p*-ТИПА

Аннотация. Методом нестационарной спектроскопии глубоких уровней (DLTS) с использованием n^+ - p -структур исследовано влияние инъекции неосновных носителей заряда (электронов) на отжиг комплекса собственное димеждоузлие – кислород (I_2O) в кремнии, облученном альфа-частицами. Показано, что в легированном бором кремнии, имеющем удельное сопротивление 10 Ом·см, инжекционно-стимулированный отжиг этого комплекса при комнатной температуре начинается при плотности прямого тока $\sim 1,5$ А/см². При этом суммарная концентрация радиационных дефектов не превышала 15 % от начальной концентрации бора. В результате инжекционно-стимулированного отжига I_2O образуется двухвалентная дырочная ловушка с уровнями $E_v + 0,43$ эВ и $E_v + 0,54$ эВ. Установлено, что в кремнии p -типа проводимости эта ловушка соответствует эмиссии дырок метастабильной конфигурацией бистабильного дефекта (BH -конфигурация). В основной конфигурации (ME -конфигурация) этот бистабильный дефект проявляет себя как электронная ловушка с уровнем $E_c - 0,35$ эВ. На основании данных об отношении амплитуд сигнала DLTS бистабильного дефекта в различных конфигурациях сделан вывод, что в ME -конфигурации он ведет себя как центр с отрицательной корреляционной энергией. Показано, что наличие инжекционно-стимулированных процессов существенно затрудняет получение достоверных данных о кинетике образования бистабильного дефекта в BH -конфигурации при исследовании термического отжига комплекса собственное димеждоузлие – кислород.

Ключевые слова: кремний, радиационные дефекты, междоузельные атомы, рекомбинационно-ускоренные реакции

Для цитирования. Инжекционный отжиг комплекса собственное димеждоузлие – кислород в кремнии p -типа / Л. Ф. Макаренко [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-мат. наук. – 2018. – Т. 54, № 2. – С. 220–228. <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2018-54-2-220-228>

L. F. Makarenko¹, S. B. Lastovskii², E. Gaubas³, J. Pavlov³, M. Moll⁴, H. S. Yakushevich², L. I. Murin²

¹Belarusian State University, Minsk, Belarus²Scientific and Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus³Institute of Photonics and Nanotechnology, Vilnius, Lithuania⁴CERN, Geneva, Switzerland

INJECTION ANNEALING OF THE SELF DI-INTERSTITIAL – OXYGEN COMPLEX IN *p*-TYPE SILICON

Abstract. With the use of deep level transient spectroscopy (DLTS) the effect of injection of minority charge carriers (electrons) on an annealing rate of self di-interstitial – oxygen (I_2O) complex in silicon has been studied. The complex has been formed by irradiation of epitaxial boron-doped n^+ - p diode structures with alpha-particles at room temperature. It has been shown that the disappearance of this complex at room temperature begins at a direct current density of ~ 1.5 A/cm². This characteristic current density has been found for 10 Ω -cm p -type silicon when the total radiation defect density was less than 15 % of the initial boron concentration, a divalent hole trap with energy levels of $E_v + 0.43$ eV and $E_v + 0.54$ eV has been found to appear as a result of recombination-enhanced annealing of the I_2O . When the I_2O complex is annealed thermally, the concurrent appearance of an electron trap with an energy level of $E_c - 0.35$ eV has been observed. It has been shown that the divalent hole trap represents a metastable configuration (BH -configuration) of the bistable defect, whereas the electron trap is stable in the p -Si configuration (ME -configuration). From the comparison of DLTS signals related to different defect configurations it is found that the ME -configuration of this bistable defect can be characterized as a center with negative correlation energy. It has been shown that the injection-stimulated processes make it very difficult to obtain reliable data on the formation kinetics of the bistable defect in the BH -configuration when studying the thermal annealing of the I_2O complex.

Keywords: silicon, radiation defects, interstitial atoms, recombination-enhanced reactions

For citation. Makarenko L. F., Lastovskii S. B., Gaubas E., Pavlov J., Moll M., Yakushevich H. S., Murin L. I. Injection annealing of the self di-interstitial – oxygen complex in p -type silicon. *Vestsi Natsyianal'nei akademii navuk Belarusi. Seriya fizika-matematychnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*, 2018, vol. 54, no. 2, pp. 220–228 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2018-54-2-220-228>

Введение. Явление инжекционно-ускоренного отжига радиационных дефектов в кремнии p -типа проводимости было впервые обнаружено достаточно давно. Так, в работе [1] сообщалось об инжекционно-ускоренном отжиге одиночных вакансий. Ускорение миграции междоузельных атомов бора (V_i) и алюминия (Al_i) посредством возбуждения электронно-дырочной подсистемы кристалла наблюдалась в [2, 3]. Наиболее чувствительным к такому возбуждению являются реакции собственного междоузельного атома кремния ($I \equiv Si_i$). В статьях [4, 5] показано, что активация реакций с участием собственного междоузельного атома при температуре жидкого азота в диодах на основе p -Si наблюдается уже при пропускании прямого тока $J_f \sim 0,01$ А/см². Величина J_f значительно ниже плотности тока, требуемого для активации миграции междоузельного атома примеси бора [5].

Рекомбинационно-стимулированному отжигу подвержены не только простейшие дефекты (V_i , I , V_i , Al_i), но и комплексы дефектов. Так, в работе [6] было показано, что при инжекции электронов энергия активации бор-кислородного комплекса V_iO_i понижается на величину ~ 1 эВ, которая сравнима с шириной запрещенной зоны кремния. Однако для такого существенного понижения энергии отжига требуются значительно более высокие плотности токов инжекции, чем это необходимо для дефектов типа V_i или Al_i .

Примесные атомы кислорода служат ловушкой как для одиночных междоузельных атомов, так и для более сложных междоузельных комплексов, одним из которых является пара междоузельных атомов кремния – димеждоузельный комплекс (I_2). Впервые на возможность образования комплекса димеждоузельный – междоузельный атом кислорода (I_2O) было указано в [7]. Этот комплекс может быть зарегистрирован с использованием спектроскопии ИК-поглощения как линия 936 см⁻¹, которая возникает при облучении кристаллов кремния, выращенных по методу Чохральского. Как показано в [8], комплекс I_2O является одним из доминирующих радиационных дефектов в сильно облученных кристаллах кремния. Было установлено [9], что он имеет донорный уровень вблизи $E_v + 0,09$ эВ и может, таким образом, наблюдаться посредством метода емкостной спектроскопии глубоких уровней (DLTS). Используя этот метод, удалось определить ряд характеристик комплекса I_2O , в частности энергию активации отжига, которая составляет $E_a = 1,05$ эВ. Кроме того, в дополнение к данным ИК-поглощения с использованием метода DLTS найден новый бистабильный электрически активный дефект (BH -центр), который представляет собой продукт отжига центра $E_v + 0,09$ эВ. Обнаружение продукта отжига I_2O важно для установления механизма его исчезновения, развития представлений о поведении междоузельных дефектов в кремнии и их влияния на свойства приборных кремниевых структур.

Вместе с тем имеет место некоторое несоответствие между температурами отжига центра $E_v + 0,09$ эВ, наблюдаемых в [9], и температурами появления бистабильного дефекта, приведенных в [10]. В настоящей работе будет показано, что это несоответствие может быть связано с инжекционно-стимулированным отжигом комплекса.

Методика эксперимента. Исследовались кремниевые n^+p -структуры (диоды), созданные на основе эпитаксиальных слоев кремния p -типа толщиной 50 мкм, выращенных на легированной бором кремниевой подложке толщиной 525 мкм с удельным сопротивлением 0,006 Ом·см. n^+ -Слой создавался посредством диффузии фосфора при температуре 1050 °С. Концентрация дырок в p -областях структур, обусловленная легированием бором во время эпитаксиального роста слоев, оценивалась исходя из измерений вольт-фарадных характеристик и составила $9 \cdot 10^{14}$ см⁻³. Содержание кислорода, проникшего в диоды в процессе их изготовления, определялось по скорости отжига междоузельного углерода с применением представленной в [11] калибровки и составляло $[O] \approx 1,5 \cdot 10^{17}$ см⁻³. Концентрация углерода рассчитывалась с использованием соотношения между сечениями захвата собственных междоузельных атомов бором и углеродом [12] и составила $\approx 2 \cdot 10^{15}$ см⁻³.

Облучение осуществлялось α -частицами с помощью поверхностного источника частиц при температурах примерно 280–290 К. Энергия α -частиц имела значения ~ 5 МэВ, время облучения составляло 40–150 мин. Поверхностная активность источника была около $2 \cdot 10^7$ Бк/см². Распределение радиационно-индуцированных дефектов, создаваемых при облучении таким поверхностным источником, приводится в [11].

Исследование электрически активных радиационно-индуцированных дефектов выполнялось методом емкостной спектроскопии глубоких уровней. Далее будут использоваться два обозначения для экспериментальных спектров: DLTS, когда заполнение ловушек осуществлялось основными носителями заряда (напряжение 0 В или заполняющие импульсы обратного смещения диода), и MC-DLTS, когда в процессе заполнения ловушек инжектировались неосновные носители заряда (заполняющие импульсы прямого смещения). Очевидно, что в спектрах DLTS проявляются только ловушки основных носителей заряда. В спектрах MC-DLTS дополнительно проявляются и ловушки неосновных носителей заряда, но лишь те, которые характеризуются достаточно высокой асимметрией сечений захвата носителей заряда разных знаков. При этом амплитуда ловушек основных носителей заряда может даже увеличиваться за счет большего расширения квазинейтральной области при положительных напряжениях заполняющего импульса.

Для регистрации спектров DLTS использовались две установки. Измерения в диапазоне температур 30–270 К проводились с применением спектрометра HERA-DLTS FT-1300 [12], в диапазоне температур 79–270 К – спектрометра «Світанак», созданного в НИИ прикладных физических проблем БГУ. Установка «Світанак» позволяла также реализовать при измерениях MC-DLTS более высокие максимальные значения прямого тока во время заполняющего импульса.

Идентификация ловушек проводилась на основании определения их параметров (E_i и A_i), определяющих температурную зависимость скорости эмиссии захваченных носителей заряда в соответствии с уравнением

$$e_i(T) = A_i T^2 \exp\left(-\frac{E_i}{kT}\right). \quad (1)$$

Параметр E_i есть энергия ионизации ловушки, а множитель A_i определяется свойствами полупроводника и сечением захвата носителей заряда ловушкой.

Отжиг при температурах свыше 100 °С в течение ~30 мин проводился на воздухе в модифицированной трубчатой печи, колебания температуры в которой в стационарном режиме не превышали ± 3 К. Ниже 100 °С образцы отжигались непосредственно в криостате DLTS-спектрометра.

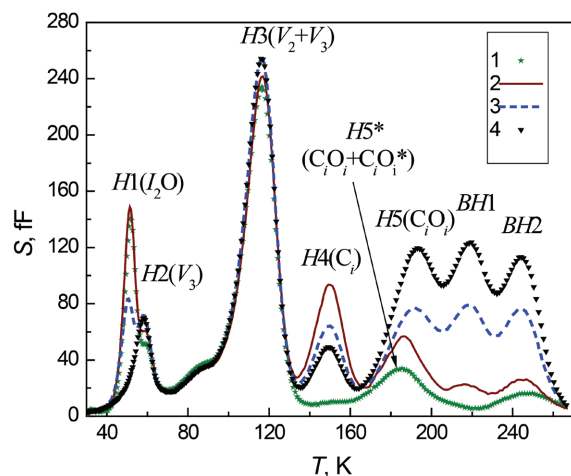


Рис. 1. Эволюция спектров DLTS после альфа-облучения (1) и последующего пропуска в течение 2 мин прямого тока с плотностью $J_f = 1,6$ А/см² (2); $J_f = 6,4$ А/см² (3); $J_f = 12,8$ А/см² (4). Условия измерения: окно скоростей эмиссии $e_w = 57$ с⁻¹ для всех спектров; изменение смещения $-3 \rightarrow 0$ В и длительность заполняющего импульса $t_p = 10$ мс

Fig. 1. DLTS spectra registered after irradiation with alpha-particles (1) and after subsequent direct current injection during 2 min with the density $J_f = 1.6$ А/см² (2); $J_f = 6.4$ А/см² (3); $J_f = 12.8$ А/см² (4). Measurement conditions: emission rate window $e_w = 57$ s⁻¹ for all spectra, the bias change $-3 \rightarrow 0$ V, and the filling pulse duration $t_p = 10$ ms

Экспериментальные результаты и их обсуждение. Сигнал DLTS, связанный с уровнем $E_v + 0,09$ эВ, может быть зарегистрирован только в области температур 40–50 К. Исследование поведения этого пика проводилось нами с использованием спектрометра HERA-DLTS. Полученные спектры DLTS для исследованных n^+p -диодов приведены на рис. 1, где кривая 1 соответствует спектру, полученному сразу после облучения. В спектре проявляется ряд ловушек, которые были идентифицированы ранее (см. [9, 13, 14]). Пик H1 соответствует ионизации комплекса I_2O . Значения его параметров были определены нами как $E_{H1} = 0,091$ эВ и $A_{H1} = 1,3 \cdot 10^7$ с⁻¹ и согласуются с данными работы [9]. Пик H2 соответствует ионизации одной из конфигураций тривакансии [14]. Значения энергии активации эмиссии дырок и предэкспоненциальный фактор этого центра равны $E_{H2} = 0,103$ эВ и $A_{H2} = 8,5 \cdot 10^5$ с⁻¹ и также согласуются с данными, полученными ранее [14]. Пик H3 соответствует суперпозиции пиков ионизации дивакансии (V_2) и тривакансии (V_3) [14].

Пики $H4$ и $H5$ связаны с междуузельным углеродом (C_i) и комплексом междуузельный углерод – междуузельный кислород (C_iO_i) соответственно. Пики $H3$, $H4$ и $H5$ хорошо известны и неоднократно наблюдались нами ранее [15]. Пик $H5^*$ представляет собой суперпозицию сигнала DLTS комплекса междуузельный углерод – междуузельный кислород в основной (C_iO_i) и метастабильной ($C_iO_i^*$) конфигурациях [16]. При комнатной температуре $C_iO_i^*$ постепенно преобразуется в основную (стабильную) конфигурацию C_iO_i [16], при этом происходит постепенный сдвиг пика $H5^*$ в более высокотемпературную область, приближаясь к пику $H5$.

Длительное хранение при комнатной температуре приводит к постепенному исчезновению ловушки $H1$. Постоянная времени ее исчезновения, оцененная из экспериментальных данных работы [9] для эпитаксиальных диодов, составляет порядка 6 недель при 24 °С. В экспериментах же по исследованию изохронного отжига (время отжига 20–30 мин) его исчезновение начинается при $T > 60^\circ\text{C}$ [9]. Однако отжиг ловушки $H1$ при комнатной температуре может быть существенно ускорен путем пропускания прямого тока через облученную n^+p -структуру.

Это хорошо видно из спектров 2–4 на рис. 1, которые показывают, что изменения спектра DLTS начинают происходить уже при пропускании через структуру прямого тока плотностью $J_f = 1,6 \text{ A/cm}^2$ в течение двух минут (кривая 2). Данные изменения становятся более ярко выраженными при повышении плотности прямого тока до $6,4 \text{ A/cm}^2$ (кривая 3). После пропускания такого тока в течение двух минут происходит существенное уменьшение амплитуды пика $H1$ и увеличение амплитуд пиков $BH1$ и $BH2$. После пропускания прямого тока с плотностью $12,8 \text{ A/cm}^2$ в течение такого же промежутка времени пик $H1$ исчезает полностью, а амплитуда пиков $BH1$ и $BH2$ достигает максимума (кривая 4). Одновременно изменяются амплитуды пиков $H4$ и $H5$.

Но, как показывают наши предыдущие исследования [4], изменения амплитуд пиков $H4$ и $H5$ не связаны с пропусканием прямого тока, а обусловлены термическим отжигом междуузельного углерода (пик $H4$) за время нахождения диода при комнатной температуре. Наблюдаемые изменения амплитуд пиков $H4$ и $H5$ позволяют утверждать, что увеличение температуры диода в процессе инжекционного отжига не превышало 12–15 К при максимальном прямом токе (0,8 А).

Параметры ловушек, ответственных за появление пиков $BH1$ и $BH2$, были определены нами как $E_{BH1} = 0,434 \text{ эВ}$, $A_{BH1} = 1,4 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$ и $E_{BH2} = 0,528 \text{ эВ}$, $A_{BH2} = 7,9 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$ соответственно. Эти ловушки наблюдались ранее в работах [10, 17] и были связаны с разными зарядовыми состояниями BH -центра [10]. Бистабильность дефекта, ответственного за ловушки $BH1$ и $BH2$, подтверждается путем проведения многократных циклов 20-минутного отжига при 80 °С и последующего пропускания прямого тока с достаточно высокой плотностью.

Изменения спектров DLTS и MC-DLTS до начала и после окончания каждого цикла такой обработки исследуемых n^+p -структур с применением установки «Світанак» показаны на рис. 2. При этом использовался тот же самый диод, спектры DLTS которого (см. рис. 1) были получены ранее с помощью установки HERA-DLTS. Перед измерениями диод прошел термообработку при 80 °С в течение 20 мин. Как видно из кривой 1, в спектре DLTS наблюдаются только два

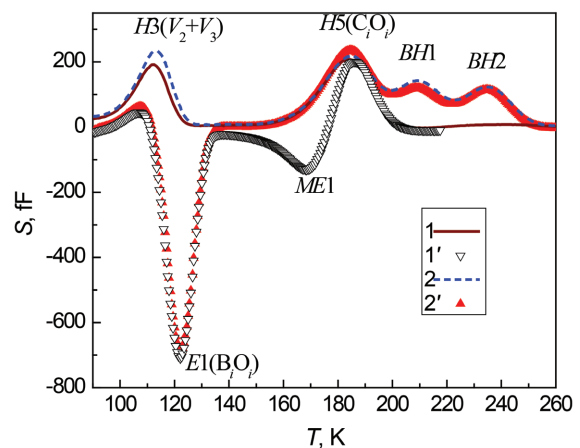


Рис. 2. Типичные спектры DLTS (линии) и спектры MC-DLTS (символы) для того же самого диода, что и на рис. 1, полученные сразу после отжига при 80 °С в течение 20 мин (I , I') и после пропускания прямого тока плотностью $J_f = 3,2 \text{ A/cm}^2$ (2 , $2'$). Условия измерения: окно скоростей эмиссии $e_w = 19 \text{ с}^{-1}$ для всех спектров; изменение смещения $-3 \rightarrow 0 \text{ В}$, длительность заполняющего импульса $t_p = 10 \text{ мс}$ для спектров I , 2 ; изменение смещения $-3 \rightarrow +2,0 \text{ В}$, длительность заполняющего импульса $t_p = 10 \text{ мс}$ для спектров I' , $2'$

Fig. 2. Conventional DLTS (lines) and MC-DLTS (symbols) spectra for the same diode as in Fig.1 registered immediately after 80 °С annealing during 20 min (I , I') and after direct current injection with the density $J_f = 3.2 \text{ A/cm}^2$ (2 , $2'$). Measurement conditions: emission rate window $e_w = 19 \text{ s}^{-1}$ for all spectra, the bias change $-3 \rightarrow 0 \text{ V}$, and the filling pulse duration $t_p = 10 \text{ ms}$ for spectra I , 2 ; the bias change $-3 \rightarrow +2.0 \text{ V}$, and the filling pulse duration $t_p = 10 \text{ ms}$ for spectra I' , $2'$

пика $H3$ и $H5$ (кривая 1). Если же через диод перед измерением дополнительно пропустить прямой ток плотностью $3,2 \text{ A/cm}^2$ в течение двух минут, что гарантирует полную перестройку BH -центра в метастабильную конфигурацию, то появляются пики $BH1$ и $BH2$, которые наблюдались ранее (см. рис. 1). Как показывает сравнение рис. 1 и 2, имеет место согласие между результатами измерений на установках HERA-DLTS и «Світанак». Некоторое отличие в температурах положения пиков связано с различием в окнах эмиссии, используемых в указанных установках.

В спектрах MC-DLTS (кривая 1', рис. 2) дополнительно к дырочным ловушкам наблюдаются и ловушки электронов, которые обозначены как $E1$ и $ME1$. Ловушка $E1$ ($E_{E1} = 0,227 \text{ эВ}$, $A_{E1} = 3,9 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$) хорошо известна и идентифицирована как комплекс междоузельный бор – междоузельный кислород (B_iO_i) [12]. Ловушка $ME1$ ($E_{ME1} = 0,353 \text{ эВ}$, $A_{ME1} = 5,0 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$) наблюдалась ранее в [18], где было показано, что она относится к метастабильному дефекту. Результаты наших измерений подтверждают эту точку зрения. Как видно из рис. 2, эта ловушка исчезает после пропускания прямого тока, и в спектрах DLTS появляются пики $BH1$ и $BH2$. То есть исчезновение ловушки $ME1$ сопровождается появлением пиков двухвалентной ловушки $BH1/BH2$. Последующий отжиг при $80 \text{ }^\circ\text{C}$ приводит к восстановлению $ME1$ и исчезновению $BH1/BH2$. Эта конверсия $ME1 \leftrightarrow BH1/BH2$ имеет место при многократном циклировании обработок – отжиге при $80 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 20 мин и пропускании прямого тока с плотностью $\sim 3\text{--}6 \text{ A/cm}^2$. Таким образом, можно предположить, что и ловушка $ME1$, и ловушка $BH1/BH2$ представляют собой различные конфигурации одного и того же дефекта. Это предположение было впервые сделано в работе [19] на основании изучения кинетики перестройки ловушки $BH1/BH2$ в стабильную конфигурацию.

Особенностью наблюдения ловушки $ME1$ является требование достаточно больших по амплитуде прямых напряжений в импульсе заполнения в процессе регистрации спектров MC-DLTS. Иными словами, для наблюдения центра $ME1$ требуется достаточно высокая плотность инжектируемых неосновных носителей заряда во время импульса заполнения. Реализация импульсов заполнения с достаточно высоким уровнем инжекции обычно не предусмотрена в стандартных спектрометрах DLTS, что может препятствовать исследованиям центра $ME1$ с их применением.

Необходимость высоких уровней инжекции электронов для наблюдения ловушки $ME1$ свидетельствует об относительно небольшой асимметрии сечений захвата электронов и дырок этой ловушкой, что может затруднять количественную оценку концентрации центра $ME1$. Поэтому

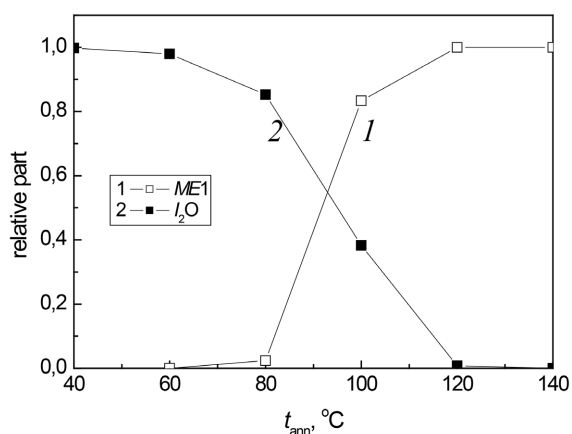


Рис. 3. Образование ловушки $ME1$ в процессе изохронного отжига (1). Кривая 2, рассчитанная из данных работы [9], соответствует исчезновению I_2O при тех же условиях отжига, длительность которого составляла 20 мин, шаг по температуре – 20 К

Fig. 3. Formation of the $ME1$ trap under isochronal annealing (1). Curve 2 (calculated from the experimental data [9]) – I_2O disappearance under the same annealing conditions, the annealing duration – 20 min with a temperature step of 20 K

при регистрации спектров MC-DLTS мы использовали максимальные уровни инжекции от генератора импульсов установки «Світанак».

На рис. 3 приведены результаты изохронного отжига, при котором появляется ловушка $ME1$. Температура ее появления (кривая 1, рис. 3) несколько выше температуры отжига C_i (см. [4]) и совпадает с температурой отжига комплекса I_2O . Кривая 2 на рис. 3 построена на основании данных, приведенных в [9] для аналогичных эпитаксиальных диодов. Таким образом, полученные результаты изохронного отжига свидетельствуют о том, что ловушка $ME1$, так же как и двойной пик $BH1/BH2$, появляется в результате отжига комплекса I_2O . Из рис. 2 видно, что амплитуда пика $ME1$ $S_{\text{max}}(ME1)$ больше амплитуды каждого из пиков: $BH1$ $S_{\text{max}}(BH1)$ и $BH2$ $S_{\text{max}}(BH1)$. Использование разности спектров 1' и 2', представленных на рис. 2, показывает, что амплитуда сигнала пика $ME1$ в 2 раза больше амплитуды каждого из пиков $BH1$ и $BH2$. На основании этого факта можно сделать вывод, что ловушка $ME1$

одновременно испускает 2 электрона, т. е. она является центром с отрицательной корреляционной энергией (negative-U-центр).

Обсуждение результатов. Для наблюдения пиков $VH1/VH2$ необходимо перевести соответствующий бистабильный центр в конфигурацию, имеющую уровни в нижней половине запрещенной зоны кремния. Для этого требуется пропускание через диод прямого тока достаточно высокой плотности. Так, в [10, 20] для такой перестройки использовались плотности тока в интервале 4,8–16 А/см². Как следует из полученных нами результатов, такие токи не только переводили уже имеющиеся бистабильные центры в требуемую конфигурацию, но и обуславливали образование новых бистабильных центров в результате инжекционного отжига комплекса I_2O . Таким образом, мы не можем установить, какая доля наблюдаемых VH -центров появилась в ходе термического отжига, а какая – вследствие инжекции электронов в процессе его конфигурационной перестройки. Отсюда можно сделать вывод, что получить однозначные результаты о кинетике образования бистабильного центра из результатов изохронного термического отжига не всегда возможно.

Именно этим объясняются противоречия по температурам образования бистабильного центра и исчезновения ловушки $E_v + 0,09$ эВ, присутствующие в [9, 10, 20]. С использованием чисто термического отжига может быть исследована только корреляция между исчезновением центра $E_v + 0,09$ эВ и бистабильной ловушкой, находящейся в конфигурации $ME1$, как это показано на рис. 3.

Важной проблемой является идентификация атомной структуры бистабильного центра $ME1/VH1/VH2$. В [10] выдвинуто предположение о том, что этот центр может быть либо комплексом собственное междоузлие – междоузельный углерод (IC_i), либо комплексом собственное междоузлие – междоузельный бор (IB_i). В последующей работе [20] считалось, что образование комплекса IC_i является более вероятным механизмом отжига I_2O , тем не менее убедительных свидетельств в пользу указанной гипотезы не получено. Так, в [20] методом ИК-поглощения исследовался отжиг дефекта, ответственного за линию 936 см⁻¹. Было установлено, что в материалах с более высоким содержанием бора и углерода температура изохронного отжига этого дефекта понижается. Однако ясно, что этот факт не позволяет однозначно установить механизм отжига I_2O и природу бистабильного VH -центра, образующегося после его распада. По нашему мнению, нет оснований отдать предпочтение какой-либо из этих гипотез о природе бистабильного центра, и для выяснения механизма отжига I_2O требуются дополнительные эксперименты с использованием образцов, содержащих различные соотношения концентраций бора и углерода.

Заключение. С применением метода нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней обнаружено, что отжиг комплекса собственное димеждоузлие – кислород (I_2O) может быть существенно ускорен путем инжекции неосновных носителей заряда (электронов). Проведены исследования электрических характеристик бистабильного дефекта, образующегося в результате отжига I_2O . Показано, что плотности токов, приводящие к исчезновению I_2O , находятся в том же интервале, что и плотности тока инжекции, требуемые для перестройки в электрически активную конфигурацию возникающего бистабильного дефекта. Это делает невозможным проведение корректного эксперимента по изучению корреляции между термическим отжигом комплекса собственное димеждоузлие – кислород и появлением бистабильного дефекта.

Выявлен новый уровень бистабильного дефекта в его основной конфигурации. Получены данные, которые свидетельствуют о том, что основная конфигурация исследованного дефекта имеет инверсный порядок следования энергетических уровней.

Благодарности. Работа выполнена в рамках задания 1.31 программы «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии», а также при частичной финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № Ф17МС-022) и Академия наук Литвы (грант № LMA-CERN-2017/2018-309326434).

Acknowledgements. This study was partially supported by the State Research Program of the Republic of Belarus “Physical material science, new materials and technologies”, the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (Grant No. F17MS-022) and by the Lithuanian Academy of Sciences (Grant No. LMA-CERN-2017/2018-309326434).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Gregory, B. L. Injection-stimulated vacancy reordering in p-type silicon at 76 °K / B. L. Gregory // *J. Appl. Phys.* – 1965. – Vol. 36, № 12. – P. 3765–3769. <https://doi.org/10.1063/1.1713944>
2. Troxell, J. R. Interstitial boron in silicon: A negative-U system. / J. R. Troxell, G. D. Watkins // *Phys. Rev. B.* – 1980. – Vol. 22, № 2. – P. 921–931. <https://doi.org/10.1103/physrevb.22.921>
3. Recombination-enhanced migration of interstitial aluminum in silicon / J. R. Troxell [et al.] // *Phys. Rev. B.* – 1979. – Vol. 19, № 10. – P. 5336–5348. <https://doi.org/10.1103/physrevb.19.5336>
4. Effect of electron injection on defect reactions in irradiated silicon containing boron, carbon, and oxygen / L. F. Makarenko [et al.] // *J. Appl. Phys.* – 2018. – Vol. 123, № 16. – P. 161576 (7 p.). <https://doi.org/10.1063/1.5010965>
5. Инжекционный отжиг радиационных дефектов междоузельного типа в легированных бором кристаллах кремния / Л. Ф. Макаренко [и др.] // *Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-мат. наук.* – 2017. – № 3. – С. 108–117.
6. Forward current enhanced elimination of the radiation induced boron-oxygen complex in silicon n^+p diodes / L. F. Makarenko [et al.] // *Phys. Status Solidi A.* – 2014. – Vol. 211, № 11. – P. 2558–2562. <https://doi.org/10.1002/pssa.201431315>
7. Complexes of the self-interstitial with oxygen in irradiated silicon: a new assignment of the 936 cm^{-1} band / J. Hermansson [et al.] // *Phys. B: Condens. Matter.* – 2001. – Vol. 302/303. – P. 188–192. [https://doi.org/10.1016/s0921-4526\(01\)00426-4](https://doi.org/10.1016/s0921-4526(01)00426-4)
8. Radiation damage in silicon exposed to high-energy protons / G. Davies [et al.] // *Phys. Rev. B.* – 2006. – Vol. 73, № 16. – P. 165202 (10 p.). <https://doi.org/10.1103/physrevb.73.165202>
9. Structure, electronic properties and annealing behavior of di-interstitial-oxygen center in silicon / V. P. Markevich [et al.] // *Solid State Phenomena.* – 2015. – Vol. 242. – P. 290–295. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.242.290>
10. Radiation-induced bistable centers with deep levels in silicon n^+p structures. / S. B. Lastovskii [et al.] // *Semiconductors.* – 2016. – Vol. 50, № 6. – P. 751–755. <https://doi.org/10.1134/s1063782616060130>
11. Reactions of interstitial carbon with impurities in silicon particle detectors / L. F. Makarenko [et al.] // *J. Appl. Phys.* – 2007. – Vol. 101, № 11. – P. 113537 (6 p.). <https://doi.org/10.1063/1.2745328>
12. Interstitial defect reactions in silicon / L. C. Kimerling [et al.] // *Mater. Sci. Forum.* – 1989. – Vol. 38/41. – P. 141–150. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.38-41.141>
13. New HERA-DLTS system [Electronic resource] // *PhysTech.* – Mode of access: <http://phystech.eu/products/dlts/dlhera.htm>. – Date of access: 27.02.2018.
14. Structure and electronic properties of trivacancy and trivacancy-oxygen complexes in silicon / V. P. Markevich [et al.] // *Phys. Status Solidi A.* – 2011. – Vol. 208, № 3. – P. 568–571. <https://doi.org/10.1002/pssa.201000265>
15. DLTS studies of carbon related complexes in irradiated n - and p -silicon / L. F. Makarenko [et al.] // *Solid State Phenomena.* – 2010. – Vol. 156/158. – P. 155–160. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.156-158.155>
16. Formation and annealing of metastable (interstitial oxygen)-(interstitial carbon) complexes in n - and p -type silicon / L. F. Makarenko [et al.] // *Semiconductors.* – 2014. – Vol. 48, № 11. – P. 1456–1462. <https://doi.org/10.1134/s1063782614110141>
17. Transformation kinetics of an intrinsic bistable defect in damaged silicon / R. M. Fleming [et al.] // *J. Appl. Phys.* – 2012. – Vol. 111, № 2. – P. 023715 (7 p.). <https://doi.org/10.1063/1.3678581>
18. Formation and annealing of boron-oxygen defects in irradiated silicon and silicon-germanium n^+p structures / L. F. Makarenko [et al.] // *AIP Conf. Proc.* – 2014. – Vol. 1583, № 1. – P. 123–126. <https://doi.org/10.1063/1.4865618>
19. Бистабильные центры с глубокими уровнями в кремниевых n^+p -структурах, облученных альфа-частицами / А. С. Якушевич [и др.] // *Актуальные проблемы физики твердого тела (ФТТ-2016): сб. докл. Междунар. науч. конф., Минск, 22–25 нояб. 2016 г.: в 3 т. / редкол.: Н. М. Олехнович (пред.) [и др.]. – Минск: Ковчег, 2016. – Т. 2. – С. 105–107.*
20. The di-interstitial in silicon: Electronic properties and interactions with oxygen and carbon impurity atoms / V. E. Gusakov [et al.] // *Phys. Status Solidi A.* – 2017. – Vol. 214, № 7. – P. 1700261 (6 p.). <https://doi.org/10.1002/pssa.201700261>

References

1. Gregory B. L. Injection-stimulated vacancy reordering in p-type silicon at 76 °K. *Journal of Applied Physics*, 1965, vol. 36, no. 12, pp. 3765–3769. <https://doi.org/10.1063/1.1713944>
2. Troxell J. R., Watkins G. D. Interstitial boron in silicon: A negative-U system. *Physical Review B*, 1980, vol. 22, no. 2, pp. 921–931. <https://doi.org/10.1103/physrevb.22.921>
3. Troxell J. R., Chatterjee A. P., Watkins G. D., Kimerling L. C. Recombination-enhanced migration of interstitial aluminum in silicon. *Physical Review B*, 1979, vol. 19, no. 10, pp. 5336–5348. <https://doi.org/10.1103/physrevb.19.5336>
4. Makarenko L. F., Lastovskii S. B., Yakushevich H. S., Moll M., Pintilie I. Effect of electron injection on defect reactions in irradiated silicon containing boron, carbon, and oxygen. *Journal of Applied Physics*, 2018, vol. 123, no. 16, pp. 161576 (1–7). <https://doi.org/10.1063/1.5010965>

5. Makarenko L. F., Lastovskii S. B., Yakushevich H. S., Moll M., Pintilie I. Injection annealing of radiation-induced interstitial defects in boron doped silicon crystals. *Vestsi Natsyianal'nai akademii navuk Belarusi. Seriya fizika-matematychnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Physics and Mathematics series*, 2017, no. 3, pp. 108–117 (in Russian).
6. Makarenko L. F., Lastovskii S. B., Yakushevich H. S., Moll M., Pintilie I. Forward current enhanced elimination of the radiation induced boron-oxygen complex in silicon n^+p diodes. *Physica Status Solidi A*, 2014, vol. 211, no. 11, pp. 2558–2562. <https://doi.org/10.1002/pssa.201431315>
7. Hermansson J., Murin L. I., Hallberg T., Markevich V. P., Lindström J. L., Kleverman M., Svensson B. G. Complexes of the self-interstitial with oxygen in irradiated silicon: a new assignment of the 936 cm^{-1} band. *Physica B: Condensed Matter*, 2001, vol. 302–303, pp. 188–192. [https://doi.org/10.1016/s0921-4526\(01\)00426-4](https://doi.org/10.1016/s0921-4526(01)00426-4)
8. Davies G., Hayama S., Murin L., Krause-Rehberg R., Bondarenko V., Sengupta A., Davia C., Karpenko A. Radiation damage in silicon exposed to high-energy protons. *Physical Review B*, 2006, vol. 73, no. 16, pp. 165202 (1–10). <https://doi.org/10.1103/physrevb.73.165202>
9. Markevich V. P., Peaker A. R., Hamilton B., Gusakov V. E., Lastovskii S. B., Murin L. I., Ganagona N., Monakhov E. V., Svensson B. G. Structure, electronic properties and annealing behavior of di-interstitial-oxygen center in silicon. *Solid State Phenomena*, 2015, vol. 242, pp. 290–295. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.242.290>
10. Lastovskii S. B., Markevich V. P., Yakushevich H. S., Murin L. I., Krylov V. P. Radiation-induced bistable centers with deep levels in silicon n^+p structures. *Semiconductors*, 2016, vol. 50, no. 6, pp. 751–755. <https://doi.org/10.1134/s1063782616060130>
11. 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>
12. Kimerling L. C., Asom M. T., Benton J. L., Drevinsky P. J., Cafer C. E. Interstitial defect reactions in silicon. *Materials Science Forum*, 1989, vol. 38–41, pp. 141–150. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.38-41.141>
13. New HERA-DLTS system. *PhysTech*. Available at: <http://phystech.eu/products/dlts/dlhera.htm> (accessed 27 February 2018).
14. Markevich V. P., Peaker A. R., Hamilton B., Lastovskii S. B., Murin L. I., Coutinho J., Torres V. J., Dobaczewski L., Svensson B. G. Structure and electronic properties of trivacancy and trivacancy-oxygen complexes in silicon. *Physica Status Solidi A*, 2011, vol. 208, no. 3, pp. 568–571. <https://doi.org/10.1002/pssa.201000265>
15. Makarenko L. F., Korshunov F. P., Lastovskii S. B., Murin L. I., Moll M. DLTS studies of carbon related complexes in irradiated n - and p -silicon. *Solid State Phenomena*, 2010, vol. 156–158, pp. 155–160. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.156-158.155>
16. Makarenko L. F., Korshunov F. P., Lastovskii S. B., Murin L. I., Moll M., Pintilie I. Formation and annealing of metastable (interstitial oxygen)-(interstitial carbon) complexes in n - and p -type silicon. *Semiconductors*, 2014, vol. 48, no. 11, pp. 1456–1462. <https://doi.org/10.1134/s1063782614110141>
17. Fleming R. M., Seager C. H., Lang D. V., Campbell J. M. Transformation kinetics of an intrinsic bistable defect in damaged silicon. *Journal of Applied Physics*, 2012, vol. 111, no. 2, pp. 023715 (1–7). <https://doi.org/10.1063/1.3678581>
18. Makarenko L. F., Lastovskii S. B., Korshunov F. P., Moll M., Pintilie I., Abrosimov N. V. Formation and annealing of boron-oxygen defects in irradiated silicon and silicon-germanium n^+p structures. *AIP Conference Proceedings*, 2014, vol. 1583, no. 1, pp. 123–126. <https://doi.org/10.1063/1.4865618>
19. Yakushevich H. S., Lastovskii S. B., Makarenko L. F., Murin L. I. Bistable centres with deep levels in silicon n^+p structures irradiated with alpha-particles. *Actual'nyye problemy fiziki tverdogo tela (FTT – 2016) : sbornik dokladov Mezhdunarodnoy konferentsii, Minsk, 22–25 noyabrya 2016. T. 2 [Actual Problems of Solid State Physics (SSP – 2016) : Proceedings of the International Scientific Conference, Minsk, 22 – 25 November 2016. Vol. 2]. Minsk, Kovcheg Publ., 2016, pp. 105–107 (in Russian).*
20. Gusakov V. E., Lastovskii S. B., Murin L. I., Tolkacheva E. A., Khirunen L. I., Sosnin M. G., Duvanskii A. V., Markevich V. P., Halsall M. P., Peaker A. R., Kolevator I. The di-interstitial in silicon: Electronic properties and interactions with oxygen and carbon impurity atoms. *Physica Status Solidi A*, 2017, vol. 214, no. 7, pp. 1700261 (1–6). <https://doi.org/10.1002/pssa.201700261>

Информация об авторах

Макаренко Леонид Федорович – кандидат физико-математических наук, доцент, Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: makarenko@bsu.by. <https://orcid.org/0000-0002-9883-581X>

Ластовский Станислав Брониславович – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, ГНПО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению» (ул. П. Бровки, 19, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: lastov@ifttp.bas-net.by

Information about the authors

Leonid F. Makarenko – Ph. D. (Physics and Mathematics), Assistant Professor, Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: makarenko@bsu.by. <https://orcid.org/0000-0002-9883-581X>

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

Гаубас Эугениюс – доктор физико-математических наук, профессор, Институт фотоники и нанотехнологии, Вильнюсский университет (Sauletekio Ave., 3, 10257, Vilnius, Republic of Lithuania). E-mail: eugenijus.gaubas@ff.vu.lt. <http://orcid.org/0000-0003-3079-8140>

Павлов Евгений – доктор философии (физика), научный сотрудник, Институт фотоники и нанотехнологии, Вильнюсский университет (Sauletekio Ave., 3, 10257, Vilnius, Republic of Lithuania). E-mail: jevgenij.pavlov@tmi.vu.lt

Молл Майкл – доктор философии (физика), руководитель проекта, EP Department (CERN EP-DT, CH-1211 Geneva 23, Switzerland). E-mail: michael.moll@cern.ch

Якушевич Анна Сергеевна – младший научный сотрудник, ГНПО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению» (ул. П. Бровки, 19, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: yakushevich@ifftp.bas-net.by

Мурин Леонид Иванович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, ГНПО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению» (ул. П. Бровки, 19, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: murin@ifftp.bas-net.by

Gaubas Eugenijus – Dr. Sc. (Habil. Dr.), Professor, Institute of Photonics and Nanotechnology, Faculty of Physics, Vilnius University (3, Sauletekio Ave., 10257, Vilnius, Republic of Lithuania). E-mail: eugenijus.gaubas@ff.vu.lt. <http://orcid.org/0000-0003-3079-8140>

Jevgenij A. Pavlov – Ph. D. (Physics), Researcher, Institute of Photonics and Nanotechnology, Vilnius University (3, Sauletekio Ave., 10257, Vilnius, Republic of Lithuania). E-mail: jevgenij.pavlov@tmi.vu.lt

Michael Moll – Ph. D. (Physics), Project Leader, EP Department (CERN EP-DT, CH-1211 Geneva 23, Switzerland). E-mail: michael.moll@cern.ch

Hanna S. Yakushevich – Junior Researcher, SSPA “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

Leonid I. Murin – Ph. D. (Physics and Mathematics), Leading Researcher, SSPA “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