

## ВЛИЯНИЕ ЗАРЯДОВОГО СОСТОЯНИЯ НА ОТЖИГ МЕЖУЗЕЛЬНОГО УГЛЕРОДА В ОБЛУЧЕННОМ КРЕМНИИ

<sup>1</sup>Коршунов Ф.П., <sup>1</sup>Якушевич А.С., <sup>1</sup>Ластовский С.Б.,  
<sup>1</sup>Мурин Л.И., <sup>2</sup>Макаренко Л.Ф.

<sup>1</sup>Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению, г. Минск, Беларусь, E-mail: yakushevich@physics.by

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет, г. Минск, Беларусь, E-mail: makarenko@bsu.by

Межузельный углерод ( $C_i$ ) – один из основных вторичных радиационных дефектов межузельного типа в облученных кристаллах кремния и кремниевых приборах [1, 2]. Он образуется в результате вытеснения атомов углерода межузельным атомом кремния из узлового в межузельное положение (механизм Уоткинса). Впервые данный дефект был идентифицирован методом ИК поглощения (полосы поглощения у 921 и 930  $\text{см}^{-1}$ ). Дальнейшая идентификация была проведена методом ЭПР (спектры Si-G12 и Si-L6).  $C_i$  наблюдается также в спектрах фотолюминесценции (линия у 856 мэВ). В запрещенной зоне Si межузельному углероду соответствуют глубокие уровни акцепторного типа  $E_C - 0,12$  эВ и донорного  $-E_V + (0,27-0,29)$  эВ. Идентификация уровней была проведена методом DLTS [3, 4], а также в результате анализа данных эффекта Холла [5, 6]. Механизм отжига  $C_i$  установлен достаточно надежно. Дефект становится подвижным в области комнатных температур и, мигрируя по кристаллу кремния, взаимодействует с межузельным кислородом ( $O_i$ ), узловым углеродом, атомами легирующих примесей (фосфором, бором) и т.д. [1]. Энергия активации отжига  $C_i$  по данным различных авторов составляет  $0,8 \pm 0,1$  эВ. В то же время в литературе нет единого мнения о том, зависят ли характеристики отжига  $C_i$  от зарядового состояния дефекта [7]. В настоящей работе методом DLTS показано, что скорость отжига  $C_i$  в кремнии  $p$ -типа существенно зависит от положения уровня Ферми (зарядового состояния  $C_i$ ).

Исследовались два типа диодных  $n^+p$ -структур. Первый тип был изготовлен на пластине кремния КДБ-5, выращенного по методу Чохральского.  $p$ - $n$ -переход формировался диффузией фосфора в  $p$ -базу в атмосфере азота и кислорода. Концентрация нескомпенсированных акцепторов составляла порядка  $N_B = 2,5 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Глубина залегания  $p$ - $n$ -перехода составляла 2–3 мкм. Образцы второго типа изготавливались аналогичным методом на эпитаксиальном  $p$ -Si с  $N_B = 5 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . В качестве омических контактов напылялся алюминий.

Образцы первого типа облучались электронами на линейном ускорителе ЭЛУ-4 (номинальная энергия электронов  $E_e = 4$  МэВ) флюенсом  $\Phi = 3 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$  при плотности потока электронов, равной  $10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Температура облучения не превышала 275 К, для чего образцы помещались в специальный контейнер со льдом. Образцы второго типа облучались  $\alpha$ -частицами с помощью источника с изотопами  $\text{Pu}^{239}$  (энергия  $\alpha$ -частиц соответствовала 5,144 и 5,157 МэВ) в течение 30 минут. Поверхностная активность источника была около  $2 \times 10^8 \text{ Бк/см}^2$ . Температура образцов в процессе облучения не превышала 260 К.

Определение характеристик радиационных дефектов (концентрация, энергия активации эмиссии и сечение захвата носителей заряда) в базовой  $p$ -области облученных диодных  $n^+p$ -структур осуществлялось методом нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней (DLTS) [2]. Спектры измерялись при длительности импульса заполнения – 0,01 с и окне скоростей эмиссии –  $19 \text{ с}^{-1}$ . Долю неотожженных дефектов определяли отношением амплитуды  $\Delta\text{CDLTS}$ -пика, соответствующего перезарядке донорного уровня  $C_i$ , после отжига к амплитуде  $\Delta C_0$  до отжига (концентрация дефектов с глубокими уровнями прямо пропорциональна амплитуде DLTS-пика). Термический отжиг облученных образцов при температурах 260–330 К проводился в криостате DLTS-спектрометра при различных значениях обратного смещения.

Основное внимание в работе уделялось донорному уровню  $E(0/+)$  дефекта  $C_i$ , который располагается в запрещенной зоне Si у  $E_V + 0,27$  эВ [5]. Нами были рассчи-

таны температурные зависимости функции заполнения уровня дырками в кристаллах  $p$ -Si с разным уровнем легирования бором ( $[B_s] = 3 \times 10^{13} - 5 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ). Расчеты показали, что только в образцах первого типа с  $[B_s] = 2,5 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$  основная часть атомов  $C_i$  положительно заряжена в области температур 260–330 К. Следовательно, в базовой  $p$ -области этих  $n^+$ - $p$ -структур можно изменить зарядовое состояние  $C_i$  (перевести в нейтральное состояние) путем приложения обратного смещения  $U_{cm}$  в процессе термического отжига.

На рисунке 1 (а) показаны изменения неотожженной доли дефектов  $C_i$  в облученных электронами  $Si n^+$ - $p$ -диодах ( $[B_s] = 2,5 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ) в процессе их 15-минутного изохронного отжига при различных значениях обратного смещения. Анализ DLTS спектров показывает, что независимо от величины обратного смещения в процессе отжига практически все подвижные атомы  $C_i$  захватываются межузельными атомами кислорода  $O_i$  с образованием комплекса  $C_i O_i$ . Однако скорость отжига заметно выше в образцах, отжигаемых под обратным смещением, то есть когда дефект  $C_i$  находится в нейтральном зарядовом состоянии. В то же время при  $U_{cm} = 0 \text{ В}$  основная часть дефектов положительно заряжена в исследуемом интервале температур отжига.

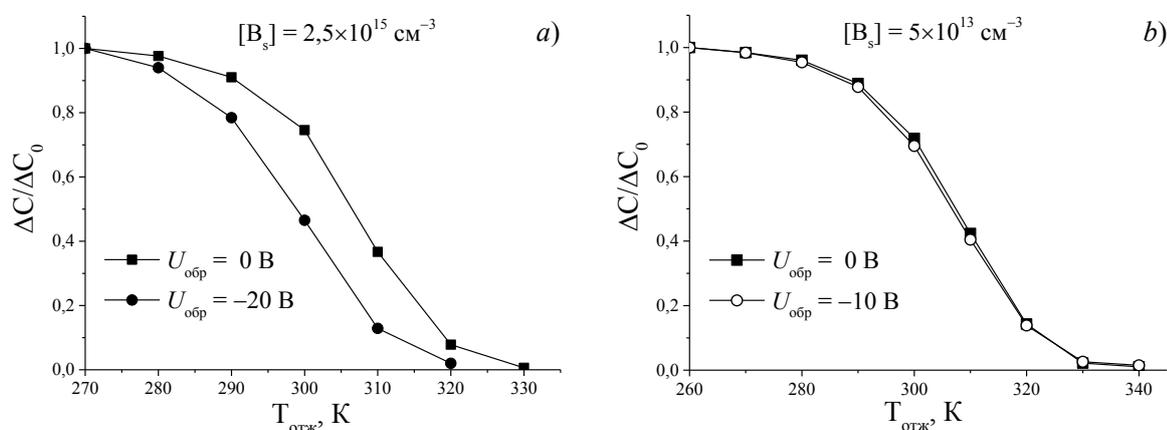


Рисунок 1 – Относительное изменение амплитуд DLTS-пиков ловушки  $C_i$  в результате изохронного (15 мин) отжига при различных значениях обратного смещения облученных электронами  $n^+$ - $p$ -структур на  $p$ -Si с  $[B_s] = 2,5 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$  и  $\alpha$ -частицами  $n^+$ - $p$ -структур на  $p$ -Si с  $[B_s] = 5 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ .

На рисунке 1 (b) показаны изменения неотожженной доли дефектов  $C_i$  в облученных  $\alpha$ -частицами  $Si n^+$ - $p$ -структурах с меньшим содержанием легирующей примеси бора ( $[B_s] = 5 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ) в процессе 15-минутного изохронного отжига при различных значениях обратного смещения. Для этих образцов скорость отжига  $C_i$  практически не зависит от величины прикладываемого смещения. Следует отметить, что в обоих режимах отжига основное зарядовое состояние  $C_i$  в исследуемом интервале температур является нейтральным.

Наряду с изохронным проводился и изотермический отжиг облученных  $n^+$ - $p$ -структур при разных значениях обратного смещения. Во всех случаях концентрация  $C_i$  экспоненциально уменьшалась с ростом времени отжига. Были определены характеристические времена отжига  $C_i$  согласно выражению  $\tau = \nu^{-1} \times \exp(\Delta E/kT)$  для исследуемых образцов при разных значениях  $U_{cm}$  (рис. 2). Для  $n^+$ - $p$ -структур первого типа в положительном ( $U_{cm} = 0$ ) зарядовом состоянии энергия активации отжига  $C_i$  составляет  $\Delta E = 0,885(\pm 0,015) \text{ эВ}$  с частотным фактором  $\nu = 1,24 \times 10^{11} \text{ с}^{-1}$ , в то время как в нейтральном ( $U_{cm} = -20 \text{ В}$ ) –  $\Delta E = 0,73(\pm 0,02) \text{ эВ}$  с  $\nu = 9,49 \times 10^8 \text{ с}^{-1}$  (рис. 2 (а)). Как отмечалось выше, для  $n^+$ - $p$ -структур второго типа дефект  $C_i$  находится в нейтральном зарядовом состоянии независимо от значения  $U_{cm}$ . Здесь энергия активации отжига составляет  $\Delta E = 0,74(\pm 0,015) \text{ эВ}$  с частотным фактором  $\nu = 6,96 \times 10^8 \text{ с}^{-1}$  (рис. 2 (b)), что коррелирует с данными по отжигу образцов первого типа при  $U_{cm} = -20 \text{ В}$ .

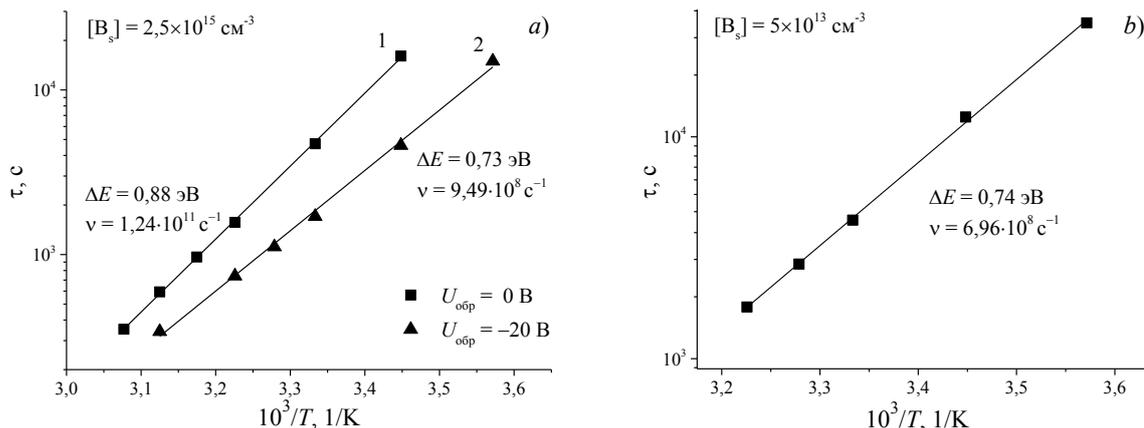


Рисунок 2 – Зависимости постоянных времени отжига  $C_i$  от температуры отжига для облученных  $n^+$ - $p$ -структур первого (а) и второго (б) типов

Таким образом, методом DLTS показано влияние зарядового состояния межузельных атомов углерода на кинетику их отжига в кремнии  $p$ -типа. Установлено, что скорость отжига  $C_i$  в положительном зарядовом состоянии существенно снижена по сравнению с таковой для нейтрального центра.

#### Список литературы:

1. Davies, G. Carbon in monocrystalline silicon / G. Davies, R.C. Newman // Handbook on semiconductors; eds. T.S. Moss, S. Mahajan. – Amsterdam, 1994. – Vol. 3. – P. 1557–1643.
2. Reactions of interstitial carbon with impurities in silicon particle detectors / L.F. Makarenko [et al.] // J. Appl. Phys. – 2007. – Vol. 101, № 11. – P. 113537(1–6).
3. Defect energy levels in boron-doped silicon irradiated with 1-MeV electrons / P.M. Mooney [et al.] // Phys. Rev. B. – 1977. – Vol. 15, № 8. – P. 3836–3843.
4. Kimerling, L.C. Defect states in proton-bombarded silicon at  $T < 300 \text{ K}$ . / L.C. Kimerling, P. Blood, W.M. Gibson // Inst. Phys. Conf. Ser. – London, 1979. – № 46. – P. 273–280.
5. Djerassi, H. Effects of  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -rays on high resistivity  $p$ -type Si / H. Djerassi, J. Merlo-Flores, J. Messier // J. Appl. Phys. – 1966. – Vol. 37, № 12. – P. 4510–4516.
6. Электрически активные дефекты межузельного типа в облученном  $n$ -кремнии / А.Г. Литвинко [и др.] // ФТП. – 1980. – Т. 14, № 4. – С. 776–780.
7. Song, L.W. EPR identification of the single-acceptor state of interstitial carbon in silicon / L.W. Song, G.D. Watkins // Phys. Rev. B. – 1990. – Vol. 42, № 9. – P. 5759–5764.