

## ОСОБЕННОСТИ ОТЖИГА КОМПЛЕКСОВ $B_iO_i$ В $p$ - $Si$ ПРИ ИНЖЕКЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

С. Б. Ластовский, Л. И. Мурин, В. А. Гуринович, В. И. Кульгачев

---

Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению  
E-mail: lastov@iftp.bas-net.by

### ВВЕДЕНИЕ

Примесные атомы бора играют важную роль в процессах радиационного дефектообразования в  $p$ - $Si$  и являются одними из основных стоков для собственных междоузельных атомов кремния, которые в условиях электронного облучения обладают чрезвычайно высокой подвижностью даже при очень низких температурах [1]. В свою очередь, междоузельные атомы бора ( $B_i$ ) также обладают высокой подвижностью и могут взаимодействовать с другими примесями [2, 3]. В промышленных кристаллах и пленках  $Si$  такой примесью являются междоузельные атомы кислорода  $O_i$ . Комплексы  $B_iO_i$ , являющиеся электрически активными центрами с донорным уровнем у  $E_C - 0,25$  эВ [4–6] и могут оказывать существенное влияние на свойства кристаллов  $Si$  и, соответственно, на параметры приборных структур. В то же время в литературе практически отсутствует информация о механизме отжига комплексов  $B_iO_i$ . В связи с вышеизложенным нами были проведены методом *DLTS* исследования влияния инжекционно-термических обработок на поведение радиационных дефектов (РД) в  $p$ -базе кремниевых диодов, облученных быстрыми электронами.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве экспериментальных образцов использовались диодные  $n^+$ - $p$ -структуры, изготовленные на пластинах кремния КДБ-4,5.  $P$ - $n$ -переход формировался диффузией фосфора в  $p$ -базу. Глубина залегания  $p$ - $n$ -перехода составляла  $2 \div 3$  мкм, площадь  $2,7 \times 2,3$  мм<sup>2</sup>. Образцы облучались электронами ( $E = 6$  МэВ) при температуре 273 К и плотности потока электронов  $10^{12}$  см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>.

Изохронный (30 минут) отжиг облученных образцов в области температур 273–398 К проводился с шагом 25 К в криостате *DLTS* спектрометра, а при более высоких температурах — в печи на воздухе. Отжиг в криостате позволял подавать на образец дополнительно прямое смещение.

Определение электронных характеристик РД в базовой области  $p$ - $n$ -структур осуществлялось методом *DLTS*. Спектры измерялись в режимах заполнения ловушек как основными, так и неосновными носителями заряда.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлены *DLTS*-спектры диодной  $n^+$ - $p$ -структуры, облученной электронами. В результате облучения в базовую  $p$ -область вводятся РД, перезарядка которых приводит к возникновению на спектрах максимумов при температурах 124, 157, 195 К и минимума при 133 К.

Ловушкам с пиками при 124, 157 и 195 К соответствуют глубокие уровни у  $E_v + 0,18$  эВ,  $E_v + 0,29$  эВ и  $E_v + 0,36$  эВ. Ловушке с минимумом при 133 К соответствует уровень донорного типа у  $E_C - 0,24$  эВ. В целом вид *DLTS* спектра типичен для облу-

ченного электронами  $p$ -Si, полученного методом Чохральского [3-8]. Уровень с максимумом при 124 К принадлежит дивакансии  $V_2(+0)$ , при 157 К — углероду внедрения  $C_i(+0)$ , при 195 К — «предвестнику» комплекса углерод внедрения — кислород внедрения  $C_iO_i^*(+0)$  [7] и уровень с минимумом при 133 К — комплексу бор внедрения — кислород внедрения  $B_iO_i(0/+)$ .

Амплитуды пиков, соответствующих вышеуказанным РД, на  $DLTS$  спектрах облученных электронами диодных  $n^+$ - $p$ -структур существенно изменяются в процессе изохронного отжига. Самой низкой термической стабильностью обладает ловушка  $C_i$ . Соответствующий пик (157 К) исчезает после  $T_{отж} = 320$  К (рис. 2). Подвижные  $C_i$  захватываются атомами кислорода с образованием термически стабильного до 670 К комплекса  $C_iO_i$ . При этом «предвестник» комплекса  $C_iO_i^*$  трансформируется в комплекс  $C_iO_i$ , что выражается в смещении на несколько градусов максимума пика  $C_iO_i$  в область более высоких температур [7].

При  $T_{отж} = 350$  К наблюдается некоторое уменьшение амплитуды пика ловушки, обычно приписываемой  $V_2$ . Это связано с изменением конфигурации тривакансии  $V_3$ . Один из глубоких уровней данного центра ( $E(0/+) = E_v + 0,19$  эВ) по своему значению близок к уровню  $V_2(+0)$  и на спектрах пики этих уровней совпадают по температуре [8]. Сразу после облучения из-за сильного возбуждения электронной подсистемы кристалла центр  $V_3$  имеет планарную структуру и  $DLTS$ -пик при 124 К представляет собой сумму пиков ловушек  $V_2(+0)$  и  $V_3(+0)$ . При  $T_{отж} = 350$  К  $V_3$  переходит в конфигурацию  $FFC$  и уровень  $V_3(+0)$  не наблюдается на спектрах [8].

На рис. 3 представлены изменения амплитуд  $DLTS$ -пиков РД в процессе изохронного отжига диодной  $n^+$ - $p$ -структуры, через которую при отжигах пропусклся прямой ток  $I_{пр} = 300$  мА. Данная  $n^+$ - $p$ -структура облучена такой же дозой электронов и при тех же условиях, что и  $n^+$ - $p$ -структура, отожженная в режиме без инжекции неосновных носителей заряда (ННЗ) (см. рис. 2).

Дополнительная инжекция ННЗ существенно влияет на характер отжига ловушек  $C_i$ ,  $C_iO_i^*$  и  $B_iO_i$ . Главным образом это выражается в том, что указанные центры начинают отжигаться при более низких температурах. Так, пропускание прямого тока через образец в течение 30 минут при 273 К ведет к полному отжигу ловушек  $C_i$  и  $C_iO_i^*$ . При этом резко возрастает амплитуда пика  $C_iO_i$ .

Для комплекса  $B_iO_i$  инжекция ННЗ приводит к уменьшению температуры отжига на 75-100 К, что видно из сравнения данных, приведенных на рисунках 2 и 3. При этом наблюдается резкое (35 %) уменьшение амплитуды пика данной ловушки уже при  $T_{отж} = 273$  К.

В результате проведенных исследований установлено, что инжекция в базовую  $p$ -область неосновных носителей заряда в процессе изохронного (30 мин.) отжига кремниевых диодных  $n^+$ - $p$ -структур, облученных электронами с  $E = 6$  МэВ, снижает на 50-100 К термическую стабильность таких радиационных ловушек, как углерод внедрения  $C_i$ , «предвестник» комплекса углерод внедрения — кислород внедрения  $C_iO_i^*$  и бор внедрения — кислород внедрения  $B_iO_i$ .

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке БРФФИ (проект Ф11-086).

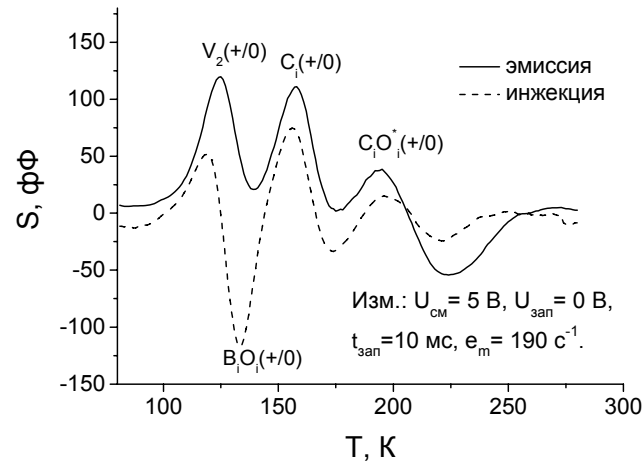


Рис. 1. DLTS-спектры облученной электронами при  $T = 273$  К дозой  $\Phi = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  диодной  $n^+p$ -структуры, измеренные при перезарядке ловушек основными (сплошная линия) и неосновными (штриховая линия) носителями заряда

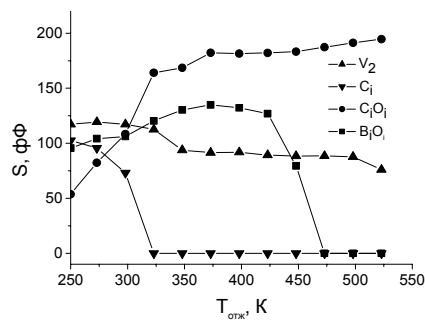


Рис. 2. Изменение амплитуд DLTS-пиков ловушек в процессе изохронного (30 мин.) отжига диодной  $n^+p$ -структуры, облученной электронами дозой  $\Phi = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$

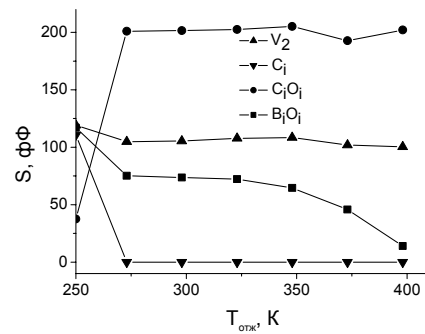


Рис. 3. Изменение амплитуд DLTS-пиков радиационных ловушек в процессе изохронного (30 мин.) отжига диодной  $n^+p$ -структуры под прямым смещением.  $\Phi = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Вавилов, В.С.* Дефекты в кремнии и на его поверхности / В.С. Вавилов, В.Ф. Киселев, Б.Н. Мукашев. М.: Наука. 1990. 216 с.
2. *Watkins, G.D.* Defects in irradiated silicon: EPR and electron-nuclear double resonance of interstitial boron / G.D. Watkins // Phys. Rev. B. 1975. Vol. 12, № 12. P. 5824.
3. *Harris, R.D.* Negative-U defect—interstitial boron in silicon / R.D. Harris, J. L. Newton, G.D. Watkins // Phys. Rev. B. 1987. Vol. 36, № 2. P. 1094.
4. *Mooney, P.M.* 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.
5. *Kimerling, L.C.* Interstitial defect reactions in silicon / L.C. Kimerling [et al.] // Materials Science Forum. 1989. Vols. 38-41. P. 141.
6. *Khan, A.*, Role of the impurities in production rates of radiation-induced defects in silicon materials and solar cells / A. Khan [et al.] // J. Appl. Phys. 2001. Vol. 90, № 3. P. 1170.
7. *Макаренко, Л.Ф.* Кинетика образования и отжига метастабильного состояния комплекса  $\text{C}_i\text{O}_i$  в кремнии p-типа / Л.Ф. Макаренко, Ф.П. Коршунов, С.Б. Ластовский, Л.И. Мурин // Доклады НАН Беларуси. 2007. Т. 51, № 5. С. 52.
8. *Markevich, V.P.* Structure and electronic properties of trivacancy and trivacancy-oxygen complexes in silicon / V.P. Markevich [et al.] // Phys. St. Sol. A. 2011. Vol. 208, № 3. P. 568.