

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ НАУЧНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
ПЕРСПЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИЙ»**

**МОСКОВСКИЙ ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОНИКИ И МАТЕМАТИКИ  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО УНИВЕРСИТЕТА «ВЫСШАЯ ШКОЛА  
ЭКОНОМИКИ» МИЭМ НИУ ВШЭ**

# **ТРУДЫ**

**XXII МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ  
«РАДИАЦИОННАЯ ФИЗИКА ТВЁРДОГО ТЕЛА»**

(Севастополь, 9-14 июля 2012 г.)

под редакцией заслуженного деятеля науки РФ, д.ф.-м.н., проф. Бондаренко Г.Г.

Москва-2012

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИ АКТИВНЫЕ ЦЕНТРЫ С ВЫСОКОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ  
СТАБИЛЬНОСТЬЮ В ОБЛУЧЕННОМ БЫСТРЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ  
КРЕМНИИ *p-TSA***

Мурин Л.И.<sup>1</sup>, Коршунов Ф.П.<sup>1</sup>, Markevich V.P.<sup>2</sup>, Литвинко А.Г.<sup>3</sup>,  
Медведева И.Ф.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению П.  
Бровки 19, 220072 Минск, Беларусь, [murin@iflt.bas-net.by](mailto:murin@iflt.bas-net.by) <sup>2</sup> The University  
of Manchester, Manchester M60 1QD, UK

<sup>3</sup> Белорусский национальный технический университет, г. Минск <sup>4</sup>  
Белорусский государственный медицинский университет, г. Минск

### **Введение.**

В облученных кристаллах кремния, подвергнутых высокотемпературным обработкам либо воздействию проникающих излучений при повышенных температурах, имеет место формирование сложных примесно-дефектных комплексов (наноразмерных кластеров), обладающих высокой термостабильностью [1-3]. Такие нанокластеры могут оказывать существенное влияние на электрические и оптические свойства материала, в том числе служить эффективными центрами рекомбинации неосновных носителей заряда в кремниевых быстродействующих приборах.

Цель данной работы - изучение методом нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней (DLTS) электрически активных центров с высокой термической стабильностью, вводимых в результате отжига при 600-5- 800 К в кремниевые  $\text{я}^+/\text{>}$ структуры, облученные быстрыми электронами при комнатной температуре.

### **Методика эксперимента.**

Исследуемые образцы изготавливались на эпитаксиальном кремнии  $\text{</>}$ -типа (легирующая примесь-бор с концентрацией  $N_B = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ), выращенном на подложке КДБ-0,005. Толщина эпитаксиального слоя составляла около 33 мкм.  $\text{I}^-$ -переход формировался имплантацией фосфора в  $\text{I}^-$ -базу с последующим отжигом при 1420 К в атмосфере азота и кислорода. Глубина залегания  $\text{I}^-$ -перехода составляла  $8 \cdot 10^9$  мкм, площадь  $\sim 9 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$  ( $2,8 \times 3,2 \text{ мм}^2$ ). В качестве омических контактов напылялся слой алюминия толщиной 4,5 мкм.

Облучение  $\text{I}^+/\text{>}$ -структур осуществлялось электронами с энергией  $E = 4$  МэВ при плотности потока электронов  $10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Температура образцов в процессе облучения не превышала 300 К. Термический отжиг облученных  $\text{I}^+$ -р-структур проводился в печи на воздухе.

Определение характеристик радиационных дефектов (концентрация, энергия активации, сечение захвата носителей заряда) в базовой области

и<sup>+</sup>-р-структур осуществлялось методом нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней (Deep Level Transient Spectroscopy-DLTS) [4]. Спектры DLTS измерялись в диапазоне температур 77н-400 К в режимах заполнения ловушек как основными, так и неосновными носителями заряда.

На рис. 1 представлены DLTS-спектры и<sup>+</sup>-р-структуры после  
15 2

облучения электронами флюенсом  $\Phi = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ . В результате облучения в базовую  $\wedge$ -область вводятся радиационные дефекты, перезарядка глубоких уровней которых приводит к возникновению на спектрах максимумов  $H1$ ,  $H2$  и минимума  $E1$ .

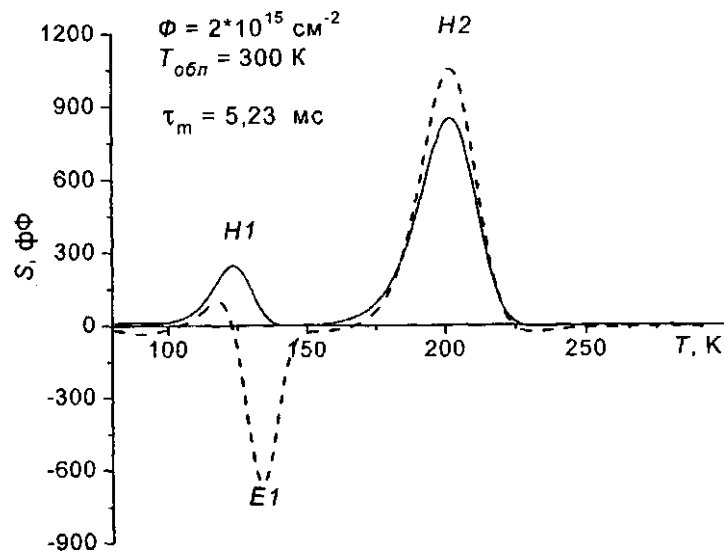


Рис. 1. DLTS-спектры и<sup>+</sup>-р-структуры, облученной быстрыми электронами при комнатной температуре ( $\Phi = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ ). Сплошная линия соответствует перезарядке ловушек основными носителями заряда, штриховая — неосновными.

Ловушкам  $H1$  и  $H2$  соответствуют глубокие уровни донорного типа у  $i\nu K$ , 19 эВ и  $\wedge$ , +0,36 эВ с сечениями захвата дырок  $\langle jhi = 5,8 \cdot 10^{16}$  и  $\sigma = 2,4 \cdot 10^{15} \text{ см}^2$ , а ловушке  $E1$  - глубокий уровень донорного типа у  $E_c - 0,24$  эВ с сечением захвата электронов  $\sigma = 1,6 \cdot 10^{15} \text{ см}^2$ . В целом вид DLTS спектра типичен для облученного электронами  $p\text{-Si}$ , полученного методом Чохральского [5-7]. Уровень  $H1$  принадлежит дивакансии  $F_2(+/0)$ , уровень  $H2$  - комплексу углерод внедрения - кислород внедрения  $C, O(+/0)$ , а уровень  $E1$  - комплексу бор внедрения - кислород внедрения  $BO, (0/-)$  [5-7].

Отжиг облученных  $\wedge$ -структур при 600 К в течение 30 минут приводит к изменению вида DLTS-спектров, что выражается в

исчезновении пиков одних типов РД и появлении других (рис. 2). Так, например, при перезарядке ловушек неосновными носителями заряда на спектре отсутствует пик ловушки  $D_0$ , но появляется пик другой ловушки с глубоким уровнем акцепторного типа у  $E_{\text{с}} + 0,31$  эВ и сечением захвата дырок  $\sigma_T = 4,9 \cdot 10^{-14}$  см<sup>2</sup>. Вероятнее всего, этой ловушкой является комплекс бор внедрения - углерод замещения  $B_i C_s$  [8]. Следует отметить, что  $B_i C_s$  образуется в значительно меньшей концентрации, чем комплекс  $V_2$ .

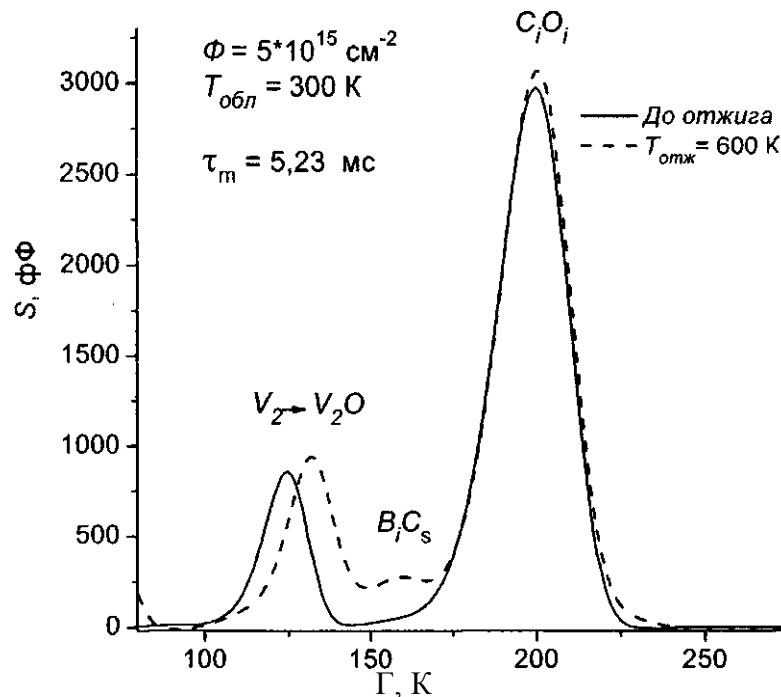


Рис. 2. DLTS-спектры  $i^+$ -р-структуры после облучения быстрыми электронами при комнатной температуре ( $\Phi = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ ) и отжига при 600 К в течение 30 минут.

После отжига при  $T_{\text{отж}} = 600 \text{ К}$  на DLTS-спектрах также исчезает пик  $V_2$  и появляется дополнительный пик с максимумом, смещенным по отношению к пику  $V_2$  на 10 К в область более высоких температур (рис. 2). Такое смещение пика дивакансии наблюдалось в работе [9] при отжиге облученного  $i^+$ -Si и трактовалось авторами как отжиг дивакансии с образованием комплекса  $V_2O$ . Это также находится в хорошем согласии и с результатами по отжигу дивакансий в облученном электронами кислородосодержащем  $n$ -Si [10], где наблюдалось некоторое смещение акцепторных уровней  $V_2$  при трансформации  $V_2$  в  $V_2O$ . О присутствии примесных атомов кислорода в значительных концентрациях в исследуемых структурах свидетельствует эффективное образование

комплексов  $C_2O$  и  $5,0$ . В связи с вышеизложенным представляется логичным идентифицировать ловушку с донорным уровнем  $\epsilon_v + 0,24$  эВ (сечение захвата дырок  $\sigma = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^2$ ) как комплекс  $V_2O$ , образующийся в результате захвата подвижных при  $T_{отж} = 600$  К дивакансий междуузельными атомами кислорода.

На рис. 3 показана эволюция DLTS-спектров в результате изохронного отжига при 600-675 К диодной  $n^+ - \text{структуры}$ ,  
 $1C_2O$

облученной флюенсом электронов  $\Phi = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ . Здесь, как и на рис. 2, показан спектр, измеренный только в режиме заполнения дырками ловушек с глубокими уровнями в нижней половине запрещенной зоны кремния. Ловушек с глубокими уровнями в верхней половине запрещенной зоны Si не обнаружено.

Повышение температуры изохронного отжига до 650 К сопровождается исчезновением на спектрах пиков, соответствующих комплексам  $V_2O$  и  $B_1C_2$  (рис. 3). При этом возникновение на DLTS- спектрах новых пиков с амплитудами, сопоставимыми с таковыми для отжигаемых дефектов, не наблюдается. Отметим, что температурный диапазон отжига  $V_2O$  и  $B_1C_2$  соответствует литературным данным [8- 10].

Наиболее существенные изменения вида DLTS-спектров наблюдаются при  $T_{отж} > 650$  К (рис. 3). При этих температурах отжигается комплекс  $C_2O$ . Его отжиг сопровождается возникновением на спектрах целого ряда новых пиков. Для большей наглядности на рис. 4 представлены спектры облученных разными флюенсами электронов  $n^+ - \text{структур}$  после отжига при 700 К в течение 30 мин. Видно, что достаточно хорошо разрешаются пики ловушек  $H5 - H8$ . Пик

ловушки  $H9$  перекрывается с пиком неотожженного полностью комплекса  $C_iO_i$ .

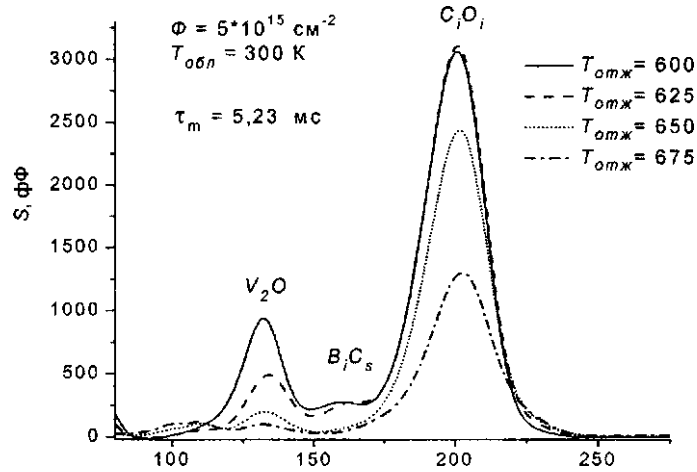


Рис. 3. Изменение вида DLTS-спектров  $n^+p$ -структуры в процессе 30-минутного изохронного отжига в интервале температур 600--675 K.

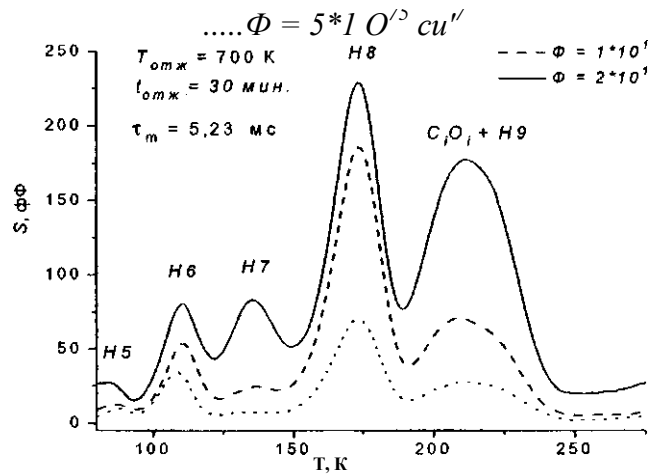


Рис. 4. Вид DLTS-спектров после стадии изохронного отжига при 700 K  $n^+p$ -структур, облученных разными флюенсами электронов при комнатной температуре.

Амплитуда DLTS пика напрямую зависит от концентрации ловушек [4]. Из полученных результатов (рис. 4) следует, что концентрация ловушек  $H5-H9$  увеличивается с ростом флюенса электронного

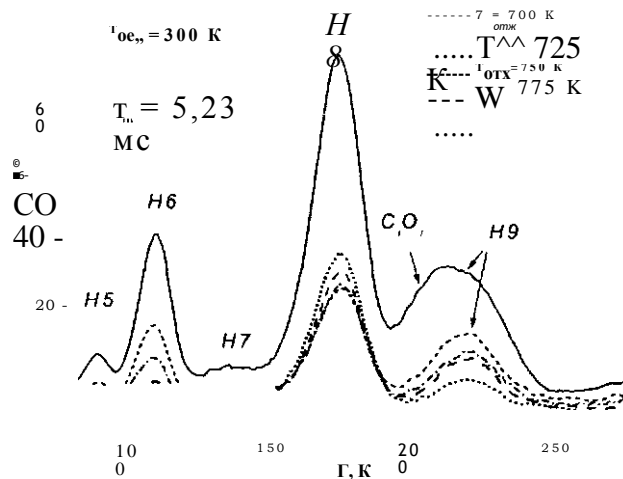
облучения, что свидетельствует о радиационно-термической природе их происхождения. Из зависимостей Аррениуса были определены параметры уровней ловушек *H5-H9*. Данные приведены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры ловушек, наблюдавшихся в р-области облученных *p-n*-структур после отжига при  $T_{отж} > 700$  К

Уровень	Энергия активации, эВ	Сечение захвата, см <sup>2</sup>
<i>H5</i>	$E_v + 0,16$	$a = 2,8 \cdot 10^{14}$
<i>ne</i>	$E_v + 0,22$	$a = 4, 10^{14}$
<i>H1</i>	$E_v + 0,24$	$a = 2,7 \cdot 10^{14}$
<i>m</i>	$E_v + 0,32$	$a = 2,4 \cdot 10^{15}$
<i>H9</i>	$E_v + 0,39$	$ст = 5,7 \cdot 10^{16}$

Пик ловушки *H9* хорошо разрешается на DLTS-спектрах при  $T_{отж} \sim 725$  К, то есть после полного отжига комплекса *C<sub>v</sub>O*, (рис. 5). Ловушки *H8* и *H9* обладают наибольшей термической стабильностью. Они наблюдаются после температур отжига вплоть до



$T_{отж} \sim 800$

Рис. 5. Вид DLTS-спектров на различных этапах изохронного (30 мин.) отжига диодной *p-n*-структуры, облученной флюенсом электронов  $\Phi = 5 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup>.

Данные, полученные методом DLTS для центров *H5-H8*, не позволяют однозначно определить их природу. Можно лишь предположить, что, скорее всего, это углеродсодержащие центры междоузельного типа. В то же время ловушку *H9*, которой соответствует глубокий уровень донорного типа у  $E_v + 0,39$  эВ, можно идентифицировать как комплекс *C<sub>v</sub>O*. Формирование этого центра

наблюдалось методом фотолюминесценции в облученных быстрыми электронами кристаллах Si при отжиге C,0, [11]. Комплексу C/Сb, в оптических спектрах соответствует Р-линия ( $h\nu = 0,767$  эВ). Донорный уровень данного комплекса должен располагаться вблизи уровня комплекса C<sub>r</sub>O<sub>r</sub>, примерно на 0,03 эВ dsit [11]. Наиболее вероятно, что комплекс SiO<sub>2i</sub> образуется в результате захвата подвижных атомов C<sub>r</sub> (появляющихся при диссоциации C<sub>r</sub>O<sub>r</sub> [12]) кислородными димерами, которые всегда присутствуют в кислородосодержащем кремнии [13]. Другими словами, формирование комплексов при отжиге облученных кристаллов Si идет согласно реакций C,0, => C, + O, и Q + O<sub>2</sub>, => SiO<sub>2i</sub>.

### Заключение.

Таким образом, методом DLTS спектроскопии изучены электронные свойства примесно-дефектных комплексов, образующихся при высокотемпературном отжиге ( $T_{отж} = 600\text{н}-800$  К) кремниевых диодных и<sup>+</sup>р-структур, облученных электронами с  $E = 4$  МэВ при  $T_{обп} \sim 300$  К. Установлено, что в результате электронного облучения в р-базу диодных и<sup>+</sup>р-структур вводятся следующие электрически активные центры: комплексы углерод внедрения - кислород внедрения C,0,, бор внедрения - кислород внедрения B<sub>r</sub>O, и дивакансия Vi. Следует ожидать, что наряду с вышеуказанными дефектами эффективно образуется и комплекс вакансия - кислород (А- центр), который в спектрах DLTS кремния-р-типа не проявляется.

После 30-минутного отжига при 600 К на DLTS спектрах присутствуют пики комплексов C,0,, VzO и B<sub>r</sub>s. Ловушки ViO и BiC<sub>s</sub> термически стабильны до 650-н660 К. Отжиг комплекса C/O, наблюдается при  $T_{отж} > 670$  К. При этом на спектрах возникают новые пики, соответствующие ловушкам с уровнями у  $E_v+0,16$  эВ,  $E_v+0,22$  эВ,  $E_v+0,24$  эВ,  $E_v+0,32$  эВ и  $E_v+0,39$  эВ. Анализ результатов с учетом литературных данных показывает, что глубокий уровень донорного типа у  $E_v+0,39$  эВ, вероятнее всего, принадлежит комплексу C,0<sub>2</sub>., которому в спектрах фотолюминесценции соответствует Р-линия ( $h\nu = 0,767$  эВ) и который обладает высокой термической стабильностью.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке БРФФИ.'

### Литература

1. Lindstrom J.L., Murin L.I., Hallberg T. et al. Defect engineering in Czochralski silicon by electron irradiation at different temperatures // Nucl. Inst. and Meth. Phys. Res. B. - 2002. - Vol. 186. - P. 121-125.



2. Murin L.I. Vacancy-oxygen defects ( $VO_n$ ,  $n>3$ ) in irradiated silicon: infrared absorption studies // Труды 16<sup>го</sup> Междунар. совещ. «РФТТ», под ред. Бондаренко Г.Г. - Москва, 2006. - С. 447-454.
3. Коршунов Ф.П., Богатырев Ю.В., Ластовский С.Б. и др. Радиационные дефекты в кремнии *p*-типа, облученном быстрыми электронами при повышенных температурах // Доклады НАН Беларуси. - 2008. - Т. 52, №3. - С. 40-43.
4. Lang D.V. Deep-level transient spectroscopy: a new method to characterize traps in semiconductors // J. Appl. Phys. - 1974. - Vol. 45, № 7. - P. 3023-3032.
5. Mooney P.M., Cheng L.J., Stili M. et al. Defect energy levels in boron-doped silicon irradiated with 1-MeV electrons // Phys. Rev. B. - 1977. - Vol. 15, №8. -P. 3836-3843.
6. Londos C.A. Carbon-related radiation damage centres and processes in *p*-type Si // Semicond. Sci. Technol. - 1990. - Vol. 5, № 7. - P. 645-648.
7. Markevich V.P., Murin L.I., Lastovskii S.B. et al. Electrically active radiation-induced defects in Czochralski-grown Si with low carbon content // J. Phys.: Condens. Matter. 2005. Vol. 17, № 22. P. S2331- S2340.
8. Kimerling L.C., Asom M.T., Benton J.L. et al. Interstitial defect reactions in silicon // Mater. Sci. Forum. 1989. Vols. 38-41. P. 141-150.
9. Trauwaert M.-A., Vanhellemont J., Maes H.E. et al. Low-temperature anneal of the divacancy in *p*-type Si: A transformation from  $V_2$  to  $V_xO_y$  complexes? // Appl. Phys. Lett. 1995. Vol. 66, № 22. P. 3056-3057.
10. Markevich V.P., Peaker A.R., Lastovskii S.B. et al. Defect reactions associated with divacancy elimination in silicon // J. Phys.: Condensed Matter. - 2003. - Vol. 15. - P. S2779-S2789.
11. Davies G., Newman R.C. Carbon in monocrystalline silicon // in Handbook on Semiconductors, Vol. 3, ed. by S. Mahajan (Elsevier North Holland, Amsterdam, 1994), Chapter 21, P. 1557-1635.
12. Murin L.I., Markevich V.P., Lindstrom J.L. et al. // Carbon-oxygen- related complexes in irradiated and heat-treated silicon: IR absorption studies // Solid State Phenomena. - 2002. - Vols. 82-84. - P. 57-62.
13. Murin L.I., Tolkacheva E.A., Markevich V.P. et al. The oxygen dimer in Si: its relationship to the light-induced degradation of Si solar cells? // Appl. Phys. Lett.-2011.-Vol. 98, № 18. -P. 182101 (1-3).