

# Модель образования донорных центров в слоях кремния, имплантированных ионами эрбия и кислорода

© О.В. Александров<sup>¶</sup>, А.О. Захарьин

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет,  
197376 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 2 апреля 2002 г. Принята к печати 11 апреля 2002 г.)

Проведено моделирование образования донорных центров при отжиге слоев монокристаллического кремния *FZ-Si* (метод бестигельной зонной плавки) и *Cz-Si* (метод Чохральского), имплантированных совместно ионами  $\text{Er}^+$  и  $\text{O}^+$ . Решались численно диффузионно-кинетические уравнения, учитывающие образование эрбиевых донорных центров трех типов — с участием кислорода подложки или имплантированного кислорода, а также собственных межузельных атомов *I*, образующихся при отжиге имплантационных нарушений, т.е. центров ( $\text{Er-I}$ ), ( $\text{Er-O}$ ) и ( $\text{Er-O-I}$ ). Расчеты удовлетворительно описывают концентрационные профили донорных центров по глубине, а также влияние кислорода подложки и имплантированного кислорода на зависимости коэффициента донорной активации эрбия от температуры отжига в диапазоне 600–1200°С.

## 1. Введение

Легирование кремния редкоземельными элементами (РЗЭ) и, в частности, эрбием представляет значительный интерес для разработки оптоэлектронных структур, интегрированных с кремниевыми микросхемами (см. обзоры [1,2]). При этом ионное легирование является одним из наиболее эффективных методов введения примесей РЗЭ, имеющих невысокую, не более  $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , равновесную растворимость в кремнии. При отжиге слоев монокристаллического кремния, имплантированных ионами  $\text{Er}^+$ , наблюдается образование оптически и электрически активных (донорных) центров (ОАЦ и ЭАЦ). О составе и электронной структуре ОАЦ и ЭАЦ в настоящее время нет четкого представления. При наличии кислорода в кремнии, выращенном по методу Чохральского, или при соимплантации кислорода с  $\text{Er}$  наблюдается увеличение концентраций ОАЦ и донорных ЭАЦ [1,2]. Показано, что центрами фотолюминесценции в кристаллическом кремнии, содержащем кислород и легированном эрбием, являются кластеры состава ( $\text{Er-O}$ ) [3]. Имплантация ионов кислорода совместно с ионами  $\text{Er}$  приводит к образованию более мелких донорных уровней [4,5], связываемых в [5] с комплексами ( $\text{Er-O}$ ) и кислородными агрегатами. На образование ОАЦ и донорных ЭАЦ оказывает влияние атмосфера постимплантационного отжига [6,7], что свидетельствует об участии в формировании ЭАЦ и ОАЦ собственных точечных дефектов. В работе [8] проведено моделирование образования донорных центров при имплантации в кремний ионов  $\text{Er}^+$  в предположении, что в их состав входят собственные межузельные атомы кремния (СМА). Цель настоящей работы — моделирование образования донорных центров при совместной имплантации в кремний ионов  $\text{Er}^+$  и  $\text{O}^+$  в предположении участия в их составе атомов кислорода.

## 2. Эксперимент

В качестве подложек использовались полированные пластины монокристаллического кремния *p*-типа проводимости, выращенного методами бестигельной зонной плавки (*FZ-Si*) и Чохральского (*Cz-Si*), с удельным сопротивлением 20 Ом · см. Ионы эрбия с энергией 1 МэВ дозой  $1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  имплантировались на установке High Voltage Engineering Europe 2КВ. В часть пластин дополнительно имплантировались ионы кислорода с энергией 135 кэВ дозой  $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ . В обоих случаях дозы имплантации не превышали пороговые дозы аморфизации кремния. Изохронные отжиги проводились в диапазоне температур  $T = 600\text{--}1200^\circ\text{C}$  в хлорсодержащей атмосфере в течение 30 мин. Коэффициент донорной активации эрбия  $k$  определялся по слоевым сопротивлениям  $R_s$ , измеренным четырехзондовым методом, с учетом концентрационной зависимости подвижности:

$$k = 1/e\mu R_s Q_{\text{Er}},$$

где  $Q_{\text{Er}}$  — доза имплантированного эрбия,  $e$  — заряд электрона,  $\mu$  — подвижность электронов. Профили распределения носителей заряда определялись методом вольт-фарадных характеристик барьера Шоттки на ртутном зонде или методом дифференциальной проводимости с удалением слоев с помощью анодного окисления.

## 3. Уравнения модели

Полагаем, что при отжиге слоев кремния, имплантированных ионами  $\text{Er}^+$  и содержащих кислород, происходит образование эрбиевых донорных центров трех типов:  $W_1$  — комплекс  $\text{Er}$  с СМА ( $\text{Er-I}$ ),  $W_2$  — комплекс  $\text{Er}$  с кислородом ( $\text{Er-O}$ ),  $W_3$  — комплекс  $\text{Er}$  с кислородом и СМА ( $\text{Er-O-I}$ ). Образование комплексов описывается

<sup>¶</sup> E-mail: aleks\_ov@mailbox.alkor.ru

следующими квазихимическими реакциями:



где  $k_1$ ,  $k_3$  и  $k_5$  — константы скоростей прямых реакций образования комплексов;  $k_2$ ,  $k_4$  и  $k_6$  — константы скоростей обратных реакций распада комплексов;  $k_i = k_{i0} \exp(-E_{ki}/k_B T)$ ,  $E_{ki}$  — энергии активации образования или распада комплексов,  $i = 1-6$ ;  $k_B$  — постоянная Больцмана. Кинетика образования донорных центров по реакциям (1)–(3) описывается следующей системой диффузионно-кинетических уравнений:

$$\frac{\partial [W_1]}{\partial t} = k_1[\text{Er}][I] - k_2[W_1] - k_5[W_1][\text{O}] + k_6[W_3], \quad (4)$$

$$\frac{\partial [W_2]}{\partial t} = k_3[\text{Er}][\text{O}] - k_4[W_2], \quad (5)$$

$$\frac{\partial [W_3]}{\partial t} = k_5[W_1][\text{O}] - k_6[W_3], \quad (6)$$

$$\frac{\partial [I]}{\partial t} = D_I \frac{\partial^2 [I]}{\partial x^2} - k_1[\text{Er}][I] + k_2[W_1] + G - R, \quad (7)$$

$$\frac{\partial [\text{O}]}{\partial t} = D_{\text{Ox}} \frac{\partial^2 [\text{O}]}{\partial x^2} - k_3[\text{Er}][\text{O}] + k_4[W_2] - k_5[W_1][\text{O}] + k_6[W_3], \quad (8)$$

где  $x$  — координата по глубине,  $t$  — время,  $D_I$  — коэффициент диффузии СМА,  $D_I = 2.75 \cdot 10^{-4} \times \exp(-1.5/k_B T)$  [8],  $D_{\text{Ox}}$  — коэффициент диффузии атомов кислорода,  $D_{\text{Ox}} = 0.22 \exp(-2.5/k_B T)$  [9],  $G$  — скорость генерации СМА при отжиге имплантационных нарушений,  $R$  — скорость рекомбинации СМА на объемных центрах. В отличие от СМА и атомов кислорода, атомы Er и их комплексы  $W_1$ ,  $W_2$  и  $W_3$  полагались неподвижными. Поэтому имеем условие сохранения полной концентрации эрбия в каждой точке начальной концентрации эрбия после имплантации:

$$[\text{Er}](x, t) + [W_1](x, t) + [W_2](x, t) + [W_3](x, t) = [\text{Er}](x, 0), \quad (9)$$

где  $[\text{Er}](x, 0)$  — начальное распределение имплантированного эрбия (экспериментальное распределение аппроксимировалось с помощью двух гауссовых распределений и „хвоста“ вида  $\exp(-ax)$ ). Скорость генерации СМА определяется скоростью отжига радиационных дефектов, введенных имплантаций,

$$G(x, t) = \frac{\chi_{\text{Er}} C_{\text{Er}}(x) + \chi_{\text{Ox}} C_{\text{Oxi}}(x)}{\tau} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad (10)$$

где  $\tau$  — постоянная времени отжига радиационных дефектов,  $\tau = \tau_0 \exp(E_\tau/k_B T)$ ,  $E_\tau$  — энергия активации отжига радиационных дефектов; члены в числителе являются начальными распределениями СМА

после имплантации эрбия и кислорода соответственно,  $C_{\text{Er}}(x)$  и  $C_{\text{Oxi}}(x)$  — начальные распределения эрбия и кислорода после имплантации, смещенные на 10% вглубь,  $\chi_{\text{Er}}$  и  $\chi_{\text{Ox}}$  — числа СМА, образующихся на один налетающий ион эрбия и кислорода соответственно. Значения смещения ( $\sim 10\%$ )  $\chi_{\text{Er}}$  и  $\chi_{\text{Ox}}$  брались по данным работы [10] в соответствии с выражением  $\chi = 1 + (0.42/R_p^{3/4})\sqrt{Em}$ , где  $R_p$  — средний процированный пробег,  $E$  — энергия и  $m$  — масса имплантированного иона:  $\chi_{\text{Er}} = 3.1$ ,  $\chi_{\text{Ox}} = 1.25$ . Часть неравновесных СМА, появляющихся в результате отжига имплантационных нарушений, участвует в образовании электрически активных центров, другая часть рекомбинирует в объеме или стекает на поверхность. Скорость объемной рекомбинации избыточных СМА определяется коэффициентом диффузии и диффузионной длиной СМА ( $L_I$ ),

$$R(x, t) = \frac{D_I([I](x, t) - I_{\text{eq}})}{L_I^2}, \quad (11)$$

где  $I_{\text{eq}}$  — равновесная концентрация СМА,  $I_{\text{eq}} = 1.25 \cdot 10^{25} \exp(-3.66/k_B T)$  [11]. Граничные условия для СМА и кислорода на поверхности (при  $x = 0$ ) и на конце области решения ( $x = d$ ) таковы:

$$[I](0, t) = I_{\text{eq}}; \quad \frac{\partial [I](d, t)}{\partial x} = 0; \\ \frac{\partial [\text{O}](0, t)}{\partial x} = \frac{\partial [\text{O}](d, t)}{\partial x} = 0. \quad (12)$$

Начальные условия для межузельных атомов кремния, кислорода и донорных центров имеют вид

$$[I](x, 0) = I_{\text{eq}}; \quad [\text{O}](x, 0) = C_{\text{Ox}} + C_{\text{Oxi}}(x); \\ [W_1](x, 0) = [W_2](x, 0) = [W_3](x, 0) = 0. \quad (13)$$

При расчетах полагалось, что в Cz-Si (выращенном по методу Чохральского) исходная концентрация кислорода составляет  $C_{\text{Ox}} \approx 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , а в FZ-Si (выращенном по методу бестигельной зонной плавки)  $C_{\text{Ox}} \approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

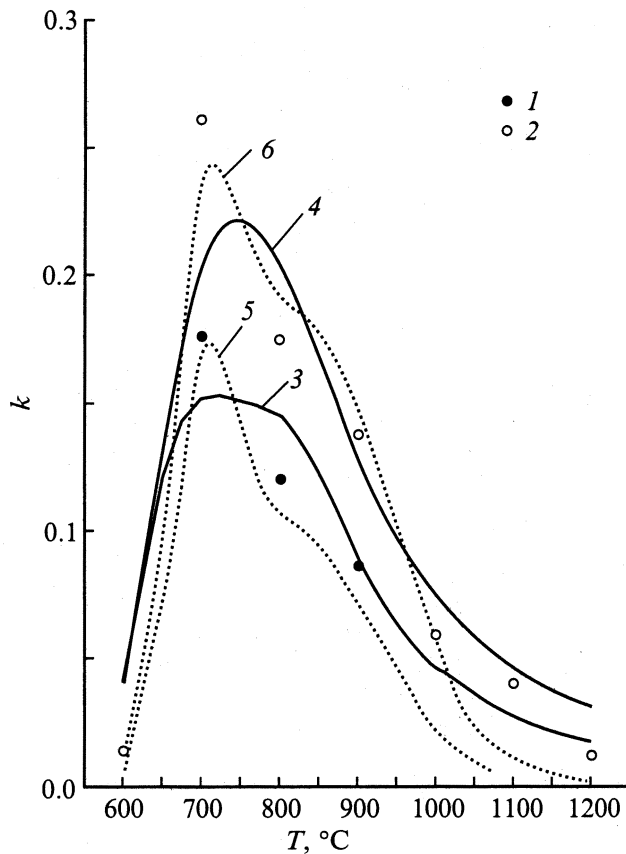
Диффузионно-кинетические уравнения (4)–(8) для компонентов, участвующих в образовании донорных центров, с условием (9), граничными условиями (12) и начальными условиями (13) решались методом конечных разностей с использованием неявной разностной схемы. Предполагалось, что помимо донорных центров  $W_1$  образуются либо донорные центры  $W_2$  ( $k_5 = k_6 = 0$ ), либо донорные центры  $W_3$  ( $k_3 = k_4 = 0$ ). Рассчитывались концентрационные профили компонентов и коэффициент донорной активации эрбия, который определялся из соотношения

$$k = \frac{1}{Q_{\text{Er}}} \int_0^{x_j} W(x) dx,$$

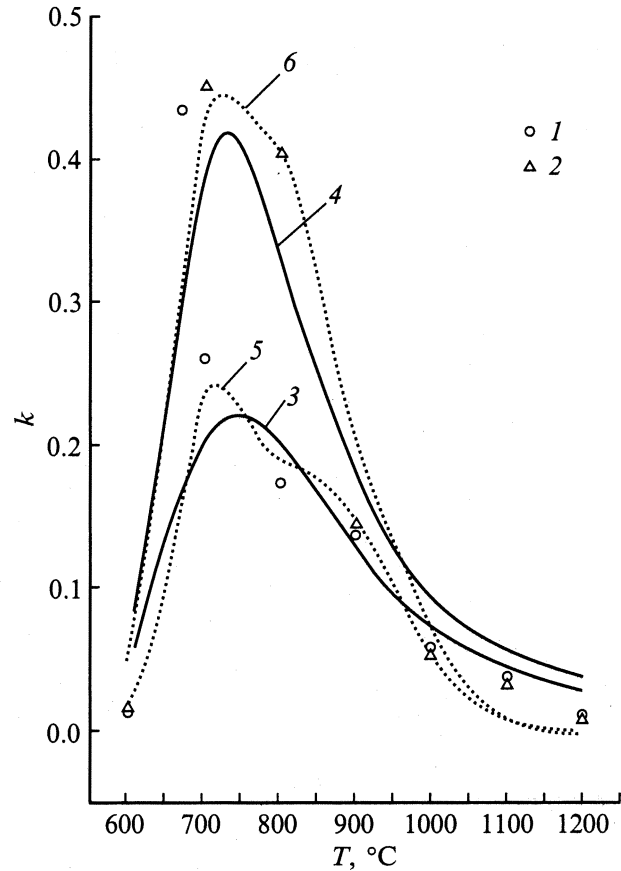
где  $Q_{\text{Er}}$  — доза имплантации ионов  $\text{Er}^+$ ,  $x_j$  — глубина залегания  $p$ - $n$ -перехода на уровне легирования подложки (уровень легирования подложки бором  $C_{\text{sub}} = 1.5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ),  $W(x)$  — распределение эрбиевых донорных центров по глубине,  $W(x) = W_1(x) + W_2(x)$  или  $W(x) = W_1(x) + W_3(x)$ .

#### 4. Влияние параметров модели на коэффициент донорной активации эрбия

Экспериментальные зависимости коэффициента донорной активации эрбия от температуры отжига как при одиночной (точки 1, 2 на рис. 1), так и при совместной с кислородом (точки 1, 2 на рис. 2) имплантации эрбия имеют вид кривых с максимумом. В рамках предлагаемой модели этот результат можно объяснить следующим образом. При увеличении температуры отжига коэффициент активации сначала растет вследствие увеличения скорости генерации неравновесных СМА при отжиге радиационных дефектов, введенных имплантацией, и образования донорных центров  $W_1$  — комплексов (Er-I). При дальнейшем увеличении температуры становятся подвижными атомы кислорода, которые диффундируют к неподвижным атомам Er или их комплексам со СМА, образуя соответственно донорные центры  $W_2$  — комплексы (Er-O) или  $W_3$  — комплексы (Er-O-I). При температурах выше  $700^\circ\text{C}$  коэффициент активации падает вследствие завершения процесса отжига имплантационных нарушений и, соответственно, истощения источника



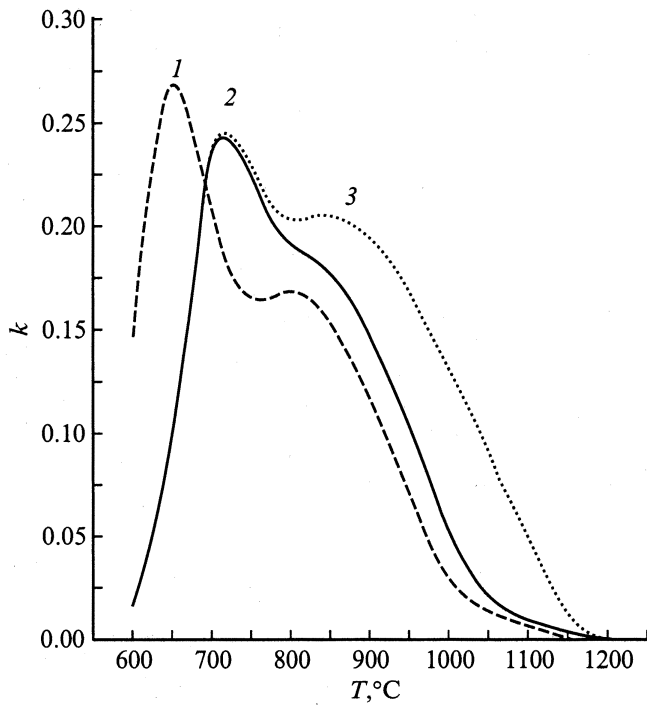
**Рис. 1.** Температурная зависимость коэффициента донорной активации эрбия в FZ-Si (1, 3, 5) и Cz-Si (2, 4, 6). 1, 2 — экспериментальные данные; (3-6) — расчетные кривые в предположении образования донорных центров типа  $W_1$  и  $W_2$  (3, 4) или  $W_1$  и  $W_3$  (5, 6).



**Рис. 2.** Температурная зависимость коэффициента донорной активации эрбия в Cz-Si в отсутствие (1, 3, 5) и при (2, 4, 6) соимплантации ионов кислорода. 1, 2 — экспериментальные данные; (3-6) — расчетные кривые в предположении образования донорных центров типа  $W_1$  и  $W_2$  (3, 4) или  $W_1$  и  $W_3$  (5, 6).

избыточных СМА вследствие диффузии избыточных СМА к поверхности, являющейся для них эффективным стоком, а также вследствие распада комплексов (Er-O) и (Er-O-I).

Постоянная времени распада имплантационных дефектов  $\tau$  в выражении (7) определяет скорость генерации СМА в процессе отжига имплантационных нарушений. При низких температурах отжига имплантационные дефекты отжигаются с невысокой скоростью, концентрации СМА и донорных центров  $W_1$  малы. С повышением температуры отжига скорость распада имплантационных дефектов повышается, коэффициент активации увеличивается. Увеличение параметра  $\tau_0$  приводит к сдвигу максимума коэффициента активации в область более высоких температур, а также к уменьшению высоты максимума (см. рис. 3, кривые 1, 2). Сдвиг максимума объясняется понижением скорости генерации СМА с увеличением  $\tau$ , а уменьшение высоты максимума — повышением скорости диффузии СМА к поверхности при более высоких температурах отжига. Диффузионная длина СМА  $L_I$  определяет скорость ре-



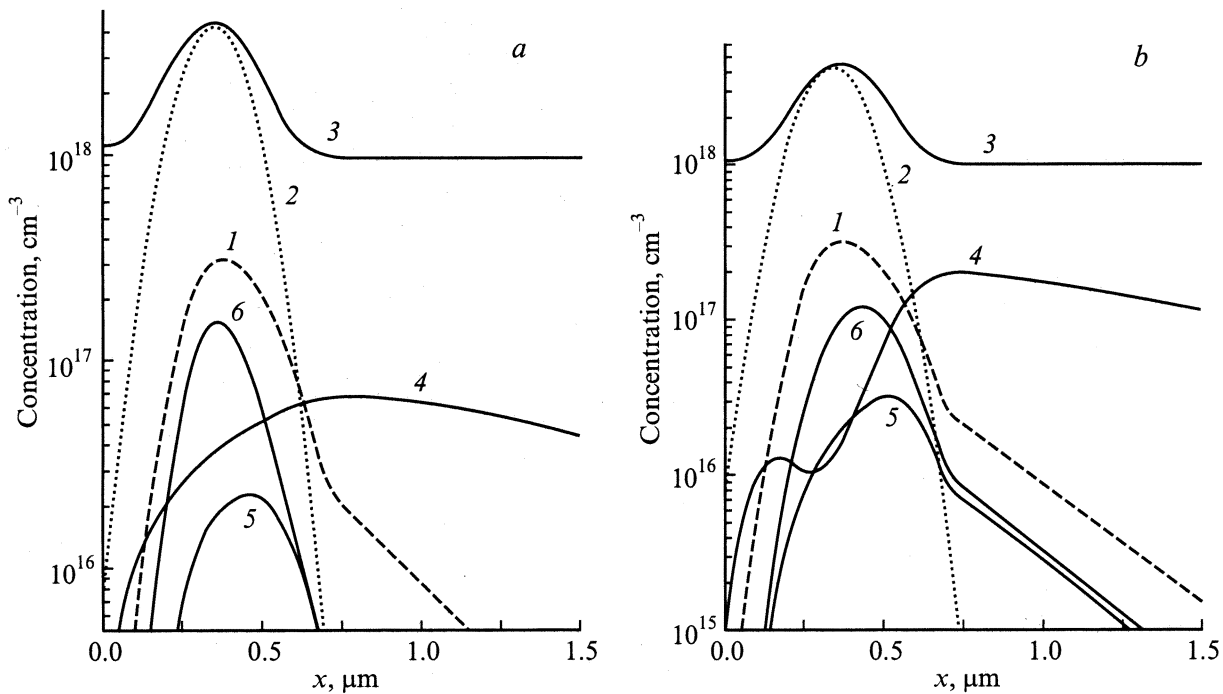
**Рис. 3.** Влияние постоянной времени отжига имплантационных дефектов (1, 2) и диффузионной длины межузельных атомов кремния (2, 3) на коэффициент донорной активации эрбия в  $Cz-Si$  при образовании донорных центров типа  $W_1$  и  $W_3$ .  $\tau_0$ , с: 1 —  $5 \cdot 10^{-8}$ , (2, 3) —  $5 \cdot 10^{-7}$ ;  $L_I$ , см: (1, 2) —  $5 \cdot 10^{-4}$ , 3 —  $8 \cdot 10^{-4}$  ( $E_T = 1.85$  эВ).

комбинации избыточных СМА. Увеличение  $L_I$  приводит к повышению коэффициента донорной активации эрбия в области температур выше  $800^\circ C$  (рис. 3, кривые 2, 3). Увеличение  $k$  обусловлено увеличением концентрации избыточных СМА вследствие уменьшения скорости их рекомбинации на объемных ловушках. Параметры  $k_1-k_6$  определяют концентрацию комплексов  $W_1, W_2, W_3$  и, следовательно, их вклад в полную концентрацию донорных центров.

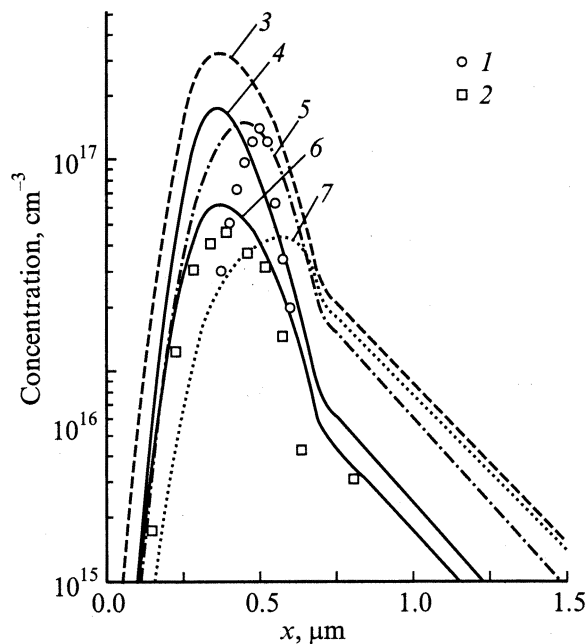
Из сравнения расчетных температурных зависимостей коэффициента донорной активации эрбия с экспериментальными были найдены следующие значения параметров:  $\tau_0 = 4.5 \cdot 10^{-7}$  с,  $E_T = 1.61$  эВ,  $k_1/k_2 = 2.5 \cdot 10^{-11} \exp(1.3/k_B T)$ ,  $k_3/k_4 = 3.2 \cdot 10^{-22} \exp(0.55/k_B T)$  при образовании  $W_1$  и  $W_2$ ;  $\tau_0 = 5 \cdot 10^{-7}$  с,  $E_T = 1.85$  эВ,  $k_1/k_2 = 1 \cdot 10^{-11} \times \exp(-1.2/k_B T)$ ,  $k_5/k_6 = 7 \cdot 10^{-18} \exp(-0.55/k_B T)$  при образовании  $W_1$  и  $W_3$ ; в обоих случаях  $L_I = 5 \cdot 10^{-4}$  см.

## 5. Результаты расчета

На рис. 1 проводится сравнение результатов расчета коэффициента активации в зависимости от температуры отжига в слоях  $FZ-Si$  и  $Cz-Si$  с соответствующими экспериментальными зависимостями. Как видно из рис. 1, значения коэффициента активации в образцах  $Cz-Si$  с более высоким содержанием кислорода (кривые 2, 4, 6)



**Рис. 4.** Профили концентраций компонентов по глубине  $Cz-Si$  при имплантации ионов  $Er^+$  и  $O^+$ . *a* — расчет с донорными центрами типа  $W_1$  и  $W_2$ ; *b* — расчет с донорными центрами типа  $W_1$  и  $W_3$ . 1 —  $[Er](x, 0)$ , 2 —  $C_{Ox}(x)$ , 3 —  $[O](x, t)$ , 4 —  $[I](x, t)$ , 5 —  $[W_1](x, t)$ , 6 —  $[W_2](x, t)$  (*a*) или  $[W_3](x, t)$  (*b*);  $T = 700^\circ C$ ,  $t = 30$  мин.



**Рис. 5.** Профили концентраций донорных центров по глубине  $Cz-Si$  при соимплантации ионов  $Er^+$  и  $O^+$ : 1, 2 — экспериментальные данные, 3 — начальное распределение  $Er$  после имплантации, (4, 5) — расчет с донорными центрами  $W_1$  и  $W_2$ , (6, 7) — расчет с донорными центрами  $W_1$  и  $W_3$ . Температура отжига,  $^{\circ}C$ : 1, 4, 5 — 700; 2, 6, 7 — 900.

выше, чем в образцах  $FZ-Si$  (кривые 1, 3, 5). Совместная с эрбием имплантация кислорода в  $Cz-Si$  приводит к дальнейшему повышению коэффициента активации (рис. 2). Из рис. 1 и 2 видно, что результаты расчета в случае образования кислородсодержащих донорных центров  $W_2$  ( $Er-O$ ) (кривые 3, 4) лучше описывают экспериментальные зависимости в области высоких температур отжига 1100–1200 $^{\circ}C$ , тогда как в случае образования донорных центров  $W_3$  ( $Er-O-I$ ), т.е. содержащих кислород и междузельный кремний, (кривые 5, 6) лучше описывают область вблизи максимума при 700–800 $^{\circ}C$ . На рис. 4 приведены расчетные профили распределений концентраций компонент — донорных центров  $W_1$  и  $W_2$  (рис. 4, а), донорных центров  $W_1$  и  $W_3$  (рис. 4, б), а также кислорода и СМА — после имплантации ионов  $Er^+$  и  $O^+$  в  $Cz-Si$  и отжига при 700 $^{\circ}C$ . В обоих случаях концентрации кислородсодержащих донорных центров  $W_2$  (кривая 6 на рис. 4, а) и  $W_3$  (кривая 6 на рис. 4, б) превышают концентрации бескислородных донорных центров  $W_1$  (кривые 5 на рис. 4, а, б). Отметим, что максимумы распределений СМА-содержащих донорных центров  $W_1$  и  $W_3$  смещены вглубь относительно максимума распределения  $Er$  в соответствии со смещением начальных распределений СМА в (10). На рис. 5 проведено сравнение экспериментальных профилей носителей заряда (точки 1, 2) с расчетными концентрационными профилями донорных центров  $[W_1] + [W_2]$  (кривые 4, 5) и донорных центров  $[W_1] + [W_3]$  (кривые 6, 7) при

температурах отжига 700 и 900 $^{\circ}C$ . Как видно из рисунка, донорные центры  $W_1$  и  $W_2$  лучше описывают профиль концентрации носителей заряда при 900 $^{\circ}C$ , тогда как донорные центры  $W_1$  и  $W_3$  лучше описывают профиль концентрации носителей заряда при 700 $^{\circ}C$ .

## 6. Заключение

Проведено моделирование образования донорных центров при отжиге слоев  $FZ-Si$  и  $Cz-Si$ , имплантационных ионами эрбия и кислорода. Составлена и численно решалась система диффузионно-кинетических уравнений, в которой учитывается образование донорных центров в виде комплексов трех типов, включающих кислород подложки и имплантированный, а также СМА, образующиеся при отжиге имплантационных нарушений: ( $Er-I$ ) —  $W_1$ , ( $Er-O$ ) —  $W_2$  и ( $Er-O-I$ ) —  $W_3$ . Показано, что модель с участием донорных центров  $W_1$  и  $W_2$ , так же как и с участием  $W_1$  и  $W_3$ , позволяет удовлетворительно описать экспериментальные зависимости коэффициента донорной активации эрбия при имплантации ионов  $Er^+$  и  $O^+$  в  $FZ-Si$  и  $Cz-Si$  от температуры отжига в диапазоне 600–1200 $^{\circ}C$ , а также профили распределения концентрации носителей заряда по глубине.

Авторы выражают благодарность Е.О. Паршину и Е.И. Шек за подготовку образцов.

## Список литературы

- [1] Н.А. Соболев. ФТП, **29**, 1153 (1995).
- [2] J. Michel, L.V.C. Assali, M.T. Morse, L.C. Kimerling. *Semicond. Semimet.*, **49**, 111 (1998).
- [3] В.Ф. Мастеров, Ф.С. Насрединов, П.П. Серегин, Е.И. Теруков, М.М. Мездрогина. ФТП, **32**, 708 (1998).
- [4] L. Palmethofer, Yu. Suprun-Belovich, M. Stepikhova. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B*, **127/128**, 479 (1997).
- [5] В.В. Емцев, В.В. Емцев (мл.), Д.С. Полоскин, Н.А. Соболев, Е.И. Шек, Й. Михель, Л.С. Кимерлинг. ФТП, **33**, 649 (1999); V.V. Emtsev Jr., C.A.J. Ammerlan, V.A. Andreev, G.A. Oganessian, D.S. Poloskin, E.I. Shek, N.A. Sobolev. *Sol. St. Phenomena*, **82-84**, 93 (2002).
- [6] Н.А. Соболев, М.С. Бреслер, О.Б. Гусев, М.И. Маковийчук, Е.О. Паршин, Е.И. Шек. ФТП, **28**, 1995 (1994).
- [7] О.В. Александров, Н.А. Соболев, Е.И. Шек, А.В. Меркулов. ФТП, **30**, 876 (1996).
- [8] N.A. Sobolev, O.V. Alexandrov, E.I. Shek. *MRS Symp. Proc.*, **442**, 237 (1997).
- [9] R.A. Devine, D. Mathiot, W.L. Warren, B. Asper. *J. Appl. Phys.*, **79**, 2302 (1996).
- [10] L. Pelaz, G.H. Gilmer, M. Jaraiz, S.B. Herner, H.-J. Gossmann, D.J. Eaglesham, G. Hobler, C.S. Rafferty, J. Barbolla. *Appl. Phys. Lett.*, **73**, 1421 (1998).
- [11] D. Maroudas, R.A. Brown. *Appl. Phys. Lett.*, **62**, 172 (1993).

Редактор Л.В. Шаронова

## A model of donor centers formation in silicon layers implanted with erbium and oxygen ions

*O.V. Aleksandrov, A.O. Zakhar'in*

St. Petersburg State Electrotechnical University,  
197376 St. Petersburg, Russia

**Abstract** The modelling of donor centers formation at an annealing of monocrystalline *FZ*-Si and *Cz*-Si layers jointly implanted by  $\text{Er}^+$  and  $\text{O}^+$  ions is carried out. The diffusion-kinetic equations were simulated with taking into account formation of three types erbium donor centers — with involvement of oxygen of a substrate, implanted oxygen and also selfinterstitials (*I*), being formed at an annealing of implantation damage —  $\text{Er-I}$ ,  $\text{Er-O}$  and  $\text{Er-O-I}$ . The calculations satisfactorily describe donor center concentration profiles along the depth, and also the influence of oxygen of the substrate as well as the implanted oxygen on the erbium donor activation coefficient under annealing within the temperature range 600–1200°C.