

Влияние кислорода на образование донорных центров в слоях кремния, имплантированных ионами эрбия и кислорода

© О.В. Александров[¶], А.О. Захарьин^{*}, Н.А. Соболев^{*¶}

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“,
197376 Санкт-Петербург, Россия

^{*} Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 16 декабря 2004 г. Принята к печати 20 декабря 2004 г.)

Развита модель образования донорных центров, обусловленных совместной имплантацией ионов Er^+ и O^+ в кремний с последующим термическим отжигом, представляющих собой многочастичные эрбий-кислородные комплексы ErO_n с $n \geq 4$. Учитывается конкурирующий процесс образования электрически неактивных кислородных кластеров. Модель позволяет описать зависимость коэффициента активации донорных центров от дозы имплантации ионов кислорода, а также влияние имплантации ионов кислорода и температуры отжига на концентрационные профили донорных центров.

1. Введение

При имплантации ионов редкоземельного элемента эрбия в кремний и последующем отжиге наряду с оптически активными центрами с длиной волны люминесценции 1.54 мкм наблюдается образование донорных центров (см. обзоры [1,2]). Концентрация эрбий-содержащих оптически активных центров и донорных центров больше в кремнии, выращенном методом Чохральского (Cz-Si) с большим содержанием кислорода ($\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$), чем в кремнии, выращенном методом зонной плавки (fz-Si) с малым содержанием кислорода ($\leq 10^{16} \text{ см}^{-3}$). Концентрации тех и других центров увеличиваются при дополнительной имплантации ионов кислорода и коррелируют друг с другом, что указывает на участие атомов кислорода в образовании эрбийсодержащих оптически активных и донорных центров [3,4]. В работах [5,6] наблюдалось изменение энергии активации мелких донорных центров при введении кислорода в имплантированные ионами эрбия слои кремния, что связывалось с образованием комплексов Er-O и кислородных термодоноров. Коэффициент активации донорных центров в процессе постимплантационного отжига, определенный как отношение интегральной (слоевой) концентрации электронов Q_a к дозе имплантации ионов эрбия Q_{Er} $f_a = Q_a/Q_{\text{Er}}$, при увеличении дозы ионов кислорода увеличивается с насыщением на уровне $f_a < 1$ и уменьшается при увеличении температуры отжига [7]. С помощью современных физических методик — рентгеновское поглощение (EXAFS), электронное эмиссионное каналирование, эмиссионная мессбауэровская спектроскопия, электронный парамагнитный резонанс — изучалась структура эрбий-кислородных центров в кремнии [8–12]. Было установлено, что атомы эрбия окружены междузельными атомами кислорода, число которых увеличивается с увеличением времени и температуры отжига [9,12].

В предшествующей работе [13] нами была предложена модель активации донорных центров в имплантированных слоях кремния, в которой предполагалось существование донорных центров в виде эрбиевых комплексов трех типов: с кислородом Er-O , с собственным междузельным атомом Er-I (I — междузельный атом), а также с тем и другим Er-O-I . В той модели не учитывались многочастичность комплексов эрбия с кислородом, а также идущий одновременно процесс кластеризации самого кислорода, который при наличии радиационных нарушений происходит с повышенной скоростью [14,15]. Это не позволило объяснить характер зависимости коэффициента активации донорных центров от дозы кислорода, а также смещение профиля донорных центров к поверхности при соимплантации кислорода.

Цель настоящей работы заключается в развитии модели образования эрбийсодержащих донорных центров в кремнии (после имплантации ионов Er^+ и O^+ и проведения термического отжига) путем учета многочастичности эрбий-кислородных комплексов и конкурирующего процесса распада твердого раствора кислорода.

2. Положения и уравнения модели

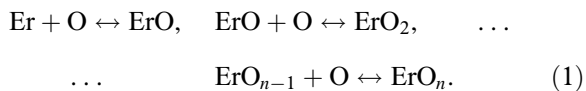
В слоях кремния, имплантированных ионами эрбия и легированных кислородом в процессе выращивания и (или) путем соимплантации, различные дефекты могут способствовать распаду твердого раствора кислорода, который в кремнии, выращенном методом Чохральского, является пересыщенным даже без дополнительной имплантации ионов кислорода. К таким дефектам относятся прежде всего атомы эрбия, имеющие сильное сродство к кислороду и способные захватывать атомы кислорода [1,2]. Образующиеся при этом эрбий-кислородные комплексы имеют сходство с кислородными термодонорами. Так же, как и кислородные термодоноры [16], эрбий-кислородные комплексы создают мелкие донорные уровни с энергией ионизации менее 0.2 эВ [5,6]. И те [17] и другие [9,12] включают в

[¶] E-mail: Aleksandrov@svs.ru

^{¶¶} E-mail: nick.sobolev@mail.ioffe.ru

свой состав несколько атомов кислорода, число которых увеличивается с увеличением температуры и времени отжига. Согласно [18,19], кислородные термодоноры представляют собой кислородные кластеры состава SiO_x при числе захваченных атомов кислорода x не менее 3–4. Аналогичным образом полагаем, что электрически активными эрбийсодержащими донорными центрами являются эрбий-кислородные комплексы, включающие, подобно кислородным термодонорам, более трех атомов кислорода ($n \geq 4$).

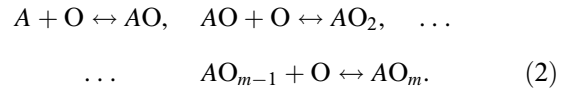
Образование и рост эрбий-кислородных комплексов ErO_n ($n = 1, 2, \dots, N$) происходит путем присоединения свободных атомов кислорода к свободному атому Er или к ранее образовавшимся комплексам:



Образование кластеров, включающих несколько атомов эрбия, в модели не учитываем, поскольку при используемых для формирования оптически активных и донорных центров температурах ($T \lesssim 900^\circ\text{C}$) и временах отжига ($t \lesssim 1$ ч), диффузионная длина атомов эрбия не превышает среднего расстояния между ними.

Другими дефектами, способствующими распаду твердого раствора кислорода в имплантированных слоях кремния, могут быть образующиеся при отжиге вторичные радиационные дефекты — вакансионные и межузельные кластеры, дислокационные петли, дислокации, микропоры и разупорядоченные области. Показано, что распад твердого раствора кислорода ускорен в кремнии, подверженном облучению высокоэнергетическими электронами [14], а также имплантации ионами кислорода [15]. В слоях кремния, имплантированных ионами с высокой энергией (F, Si, P, Ge, As), после термоотжига обнаружено накопление кислорода не только в области среднего проецированного пробега ионов R_p , где располагаются межузельные петли, но также и в области $R_p/2$, где располагаются вакансионные агломераты [20,21]. Считается, что распределение радиационных нарушений по глубине соответствует распределению упругих потерь энергии или числа смещенных атомов мишени. Расчеты [22] показывают, что это распределение сдвинуто к поверхности относительно распределения имплантированных ионов, при этом максимум распределения радиационных нарушений R_d зависит от соотношения масс иона и атома мишени и составляет $\sim 0.8R_p$ для легких ионов O^+ и $\sim 0.6R_p$ для тяжелых ионов Er⁺. Отметим, что температура и длительность отжигов, обычно используемых для формирования оптически активных и донорных центров ($T = 700\text{--}900^\circ\text{C}$, $t = 0.5\text{--}1$ ч), недостаточны для образования выделений второй фазы типа SiO_2 . Поэтому полагаем, что в имплантированных слоях образуются предвыделения — многочастичные кислородные кластеры AO_m , $m = 1, 2, \dots, M$, где A — центры кластеризации радиационного происхождения, причем образование более крупных кисло-

родных кластеров происходит путем захвата свободных атомов кислорода более мелкими кластерами:



Кислородные кластеры, сформировавшиеся таким образом на центрах радиационного происхождения, полагаем электрически неактивными. Отметим, что процесс (2) является конкурирующим процессу (1) по отношению к атомам свободного кислорода.

Поскольку коэффициент диффузии атомов эрбия в кремнии не превышает 10^{-15} см²/с при 900°C [2], что более чем на 3 порядка меньше, чем коэффициент диффузии атомов кислорода, скорость образования эрбий-кислородных комплексов, так же как и кислородных кластеров, будет определяться скоростью диффузии атомов кислорода. Для распада твердого раствора кислорода в кремнии это было неоднократно установлено (см., например, обзор [23]). Поэтому константы скоростей прямых реакций (1) и (2) выражаются соотношениями

$$k_{fn} = 4\pi r_n D_{\text{Ox}}; \quad k_{fm} = 4\pi r_m D_{\text{Ox}},$$

где D_{Ox} — коэффициент диффузии кислорода в кремнии: $D_{\text{Ox}} = 0.13 \exp(-2.53 \text{ эВ}/kT)$ [24], k — постоянная Больцмана, T — температура, r_n и r_m — радиусы захвата атомов кислорода эрбийсодержащими комплексами и кислородными кластерами соответственно. Полагаем, что соответствующие радиусы захвата увеличиваются с увеличением числа атомов кислорода в эрбиевых комплексах (n) и кислородных кластерах (m) в соответствии с соотношениями

$$r_n = b(1+n)^{1/3}, \quad r_m = c(1+m)^{1/3},$$

где b и c — радиусы захвата при $n=0$ и $m=0$ соответственно. Константы скоростей обратных реакций (1) и (2) определяются энергиями связи кислорода в эрбийсодержащих комплексах (E_W) и в кислородных кластерах (E_R) соответственно:

$$k_{rn} = \nu_W \exp[-(E_W + E_D)/kT],$$

$$k_{rm} = \nu_R \exp[-(E_R + E_D)/kT],$$

где E_D — энергия активации миграции кислорода ($E_D = 2.53$ эВ [24]), ν_W и ν_R — соответствующие частотные множители.

В предшествующей модели [13] учитывалось образование комплексов Er с участием собственных межузельных атомов кремния, образующихся при отжиге радиационных нарушений решетки кремния. Однако концентрация таких комплексов в Cz-Si, а также при соимплантации ионов кислорода значительно меньше концентраций эрбий-кислородных комплексов, и по этой причине в настоящей модели они не учитываются. В работе [6] было установлено, что в процессе распада

пересыщенного раствора кислорода в кремнии часть кислорода идет на образование электрически неактивных дефектов, скорее всего, преципитатов кислорода. Поэтому в настоящей модели учтено образование электрически неактивных кислородных кластеров. Как и в предшествующей модели [13], не учитывалось возможное образование эрбий-кислородных комплексов, включающих несколько атомов эрбия, а также кислородных термодоноров.

Диффузионно-кинетические уравнения модели для свободного кислорода, эрбий-кислородных комплексов и кислородных кластеров имеют вид

$$\frac{\partial C_{Ox}}{\partial t} = D_{Ox} \frac{\partial^2 C_{Ox}}{\partial x^2} - \sum_{n=1}^N (k_{fn} C_{Ox} C_{Wn-1} - k_{rn} C_{Wn}) - \sum_{m=1}^M (k_{fm} C_{Ox} C_{Rm-1} - k_{rm} C_{Rm}), \quad (3)$$

$$\frac{\partial C_{Wn}}{\partial t} = k_{fn} C_{Ox} C_{Wn-1} - k_{rn} C_{Wn} - k_{fn+1} C_{Ox} C_{Wn} + k_{rn+1} C_{Wn+1}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial C_{Rm}}{\partial t} = k_{fm} C_{Ox} C_{Rm-1} - k_{rm} C_{Rm} - k_{fm+1} C_{Ox} C_{Rm} + k_{rm+1} C_{Rm+1}, \quad (5)$$

где t — время отжига, x — глубина, C_{Ox} — концентрация свободного (несвязанного) кислорода, C_{Wn} — концентрация эрбиевых комплексов ErO_n , $n = 1 \dots N$, C_{Rm} — концентрация кислородных кластеров AO_m , $m = 1 \dots M$, C_{W0} и C_{R0} обозначают концентрацию свободного эрбия и центров кластерообразования $C_A(x)$ соответственно.

Атомы Er, их комплексы ErO_n , а также кислородные кластеры AO_m полагались неподвижными. Начальные концентрации эрбиевых комплексов и кислородных кластеров принимались равными нулю. Коэффициент активации донорных центров в соответствии с моделью определялся как $f_a = Q_a/Q_{Er}$, где Q_a — интегральная концентрация электрически активных донорных центров,

$$Q_a = \int \sum_{n=4}^N C_{Wn} dx,$$

Q_{Er} — полная интегральная концентрация эрбия в виде свободных атомов и эрбиевых комплексов,

$$Q_{Er} = \int \sum_{n=0}^N C_{Wn} dx,$$

интегрирование проводится по всей области решения, на конце которой концентрации всех компонентов малы. Максимально возможное число атомов кислорода в эрбиевых комплексах N и в кислородных кластерах M принималось 20, поскольку дальнейшее увеличение N и M практические не влияет на решение.

3. Результаты расчета

Система уравнений (3)–(5) решалась методом конечных разностей с использованием неявной разностной схемы и метода прогонки для (3) и метода Эйлера для (4) и (5). Решения ищались для экспериментальных условий работы [7]. Доза имплантации ионов эрбия составляла $Q_{Er} = 10^{13} \text{ см}^{-2}$, доза имплантации ионов кислорода Q_{Ox} изменялась от 10^{13} до $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$. Энергии имплантации ионов эрбия 1 МэВ и ионов кислорода 135 кэВ выбирались таким образом, чтобы максимумы концентрационных распределений эрбия и кислорода находились на одной глубине $R_p \simeq 0.35 \text{ мкм}$. Температура отжига изменялась в диапазоне от 700 до 900°С, длительность отжига составляла 30 мин.

Начальное распределение кислорода по глубине задавалось в виде гауссиана с параметрами $R_p = 0.35 \text{ мкм}$, $\Delta R_p = 0.09 \text{ мкм}$, где R_p — средний проционированный пробег, а ΔR_p — среднеквадратичный разброс пробегов. Начальное распределение ионов эрбия по глубине в соответствии с экспериментально найденным ВИМС-распределением [7] аппроксимировалось в виде двух полуГауссианов с параметрами $Q_1 = 0.72 Q_{Er}$, $\Delta R_{p1} = 0.09 \text{ мкм}$ при $x \leq R_p$ и $Q_2 = 1.28 Q_{Er}$, $\Delta R_{p2} = 0.16 \text{ мкм}$ при $x \geq R_p$ ($R_{p1} = R_{p2} = R_p = 0.35 \text{ мкм}$). Распределение концентрации центров кластеризации кислорода в имплантированном слое $C_A(x)$, соответствующее распределению остаточных радиационных дефектов после имплантации ионов эрбия и кислорода, задавалось в виде гауссиана, смещенного к поверхности относительно распределений ионов Er и O:

$$C_{A(x)} = \frac{Q_d}{\sqrt{2\pi} \Delta R_d} \exp \left[-\frac{(x - R_d)^2}{2\Delta R_d^2} \right], \quad (6)$$

где Q_d — слоевая концентрация остаточных собственных точечных дефектов, $Q_d = \chi_{Er} Q_{Er} + \chi_{Ox} Q_{Ox}$, χ_{Er} и χ_{Ox} — числа остаточных собственных точечных дефектов на один налетающий ион эрбия и кислорода соответственно, $\chi_{Er} = 3.1$, $\chi_{Ox} = 1.25$ при используемых энергиях [25], Q_{Er} и Q_{Ox} — дозы имплантации ионов Er^+ и O^+ соответственно, R_d и ΔR_d — положение максимума и ширина распределения радиационных дефектов, которые принимались: $R_d = 0.7 R_p$, $\Delta R_d = \Delta R_p$.

Использовались следующие значения параметров. Константы прямой и обратной реакции кластерообразования кислорода (2) определялись из условия равенства концентрации свободного кислорода в Cz-Si (начальная концентрация 10^{18} см^{-3}) его предельной растворимости при установлении равновесия ($C_{eq} = 5.5 \cdot 10^{20} \exp(-0.89 \text{ эВ}/kT)$ по данным работы [26]). При значениях $E_R = 0.89 \text{ эВ}$ (энтальпия растворимости кислорода) и $b = 4a$ ($a = 2.35 \text{ \AA}$ — межатомное расстояние в кремнии) получено $\nu_R = 3.6 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$. Ускорение распада твердого раствора кислорода в имплантированном слое кремния [14,15] учитывалось путем увеличения на порядок констант прямых и обратных реакций (1) и (2). Определяемыми параметрами

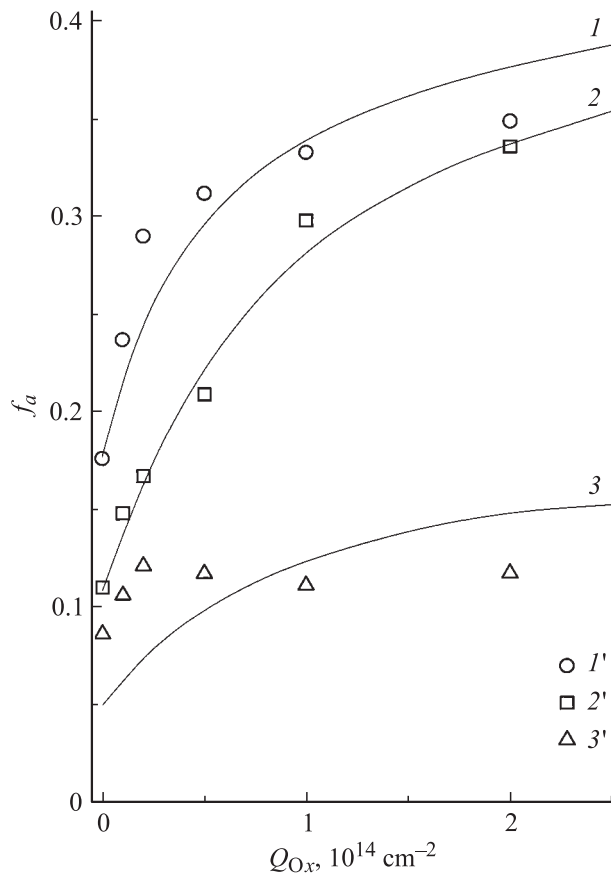


Рис. 1. Зависимости коэффициента активации донорных центров f_a от дозы имплантации (Q_{Ox}) ионов O^+ . Температура отжига, °С: 1, 1' — 700; 2, 2' — 800; 3, 3' — 900. Сплошные линии 1–3 — расчет, точки 1'–3' — эксперимент [7].

являлись радиус захвата и константа скорости обратной реакции (1) распада эрбий-кислородных комплексов — донорных центров, которые находились по дозовым зависимостям коэффициента активации донорных центров при разных температурах.

На рис. 1 показаны зависимости коэффициента активации донорных центров от дозы имплантации ионов O^+ при температурах отжига 700, 800 и 900°С по данным работы [7]. Как видно из рисунка, расчет по модели при значениях параметров: $c = 4a$, $v_W = 2.6 \cdot 10^{15} \text{ c}^{-1}$ и $E_W = 1.3 \text{ эВ}$ позволяет описать рост f_a с насыщением на уровне, меньшем 1, и уменьшение f_a с увеличением температуры отжига. Насыщение дозовой зависимости на уровне $f_a < 1$ обусловлено в данной модели не столько электрической неактивностью малых эрбий-кислородных комплексов ErO_n с $n \leq 3$, сколько наличием конкурирующего процесса захвата атомов свободного кислорода кластерами AO_m . При увеличении дозы имплантации кислорода после отжига при 700°С доминирующими оказываются комплексы ErO_n с числом атомов кислорода n , возрастающим от 3 до 4, и кислородные кластеры AO_m , с числом атомов кислорода m , возрастающим от 2 до 3. При увеличении температуры

отжига до 900°С число атомов кислорода в комплексах ErO_n уменьшается до 2–3, а в кислородных кластерах до 2. Во всех случаях преобладающими донорными центрами являются эрбий-кислородные комплексы ErO_n с $n = 4$. Уменьшение коэффициента активации f_a с увеличением температуры отжига объясняется более высокой энергией связи атомов кислорода в комплексах ErO_n (1.3 эВ), чем в кластерах AO_m (0.89 эВ).

При соимплантации ионов O^+ помимо увеличения концентрации донорных центров в максимуме распреде-

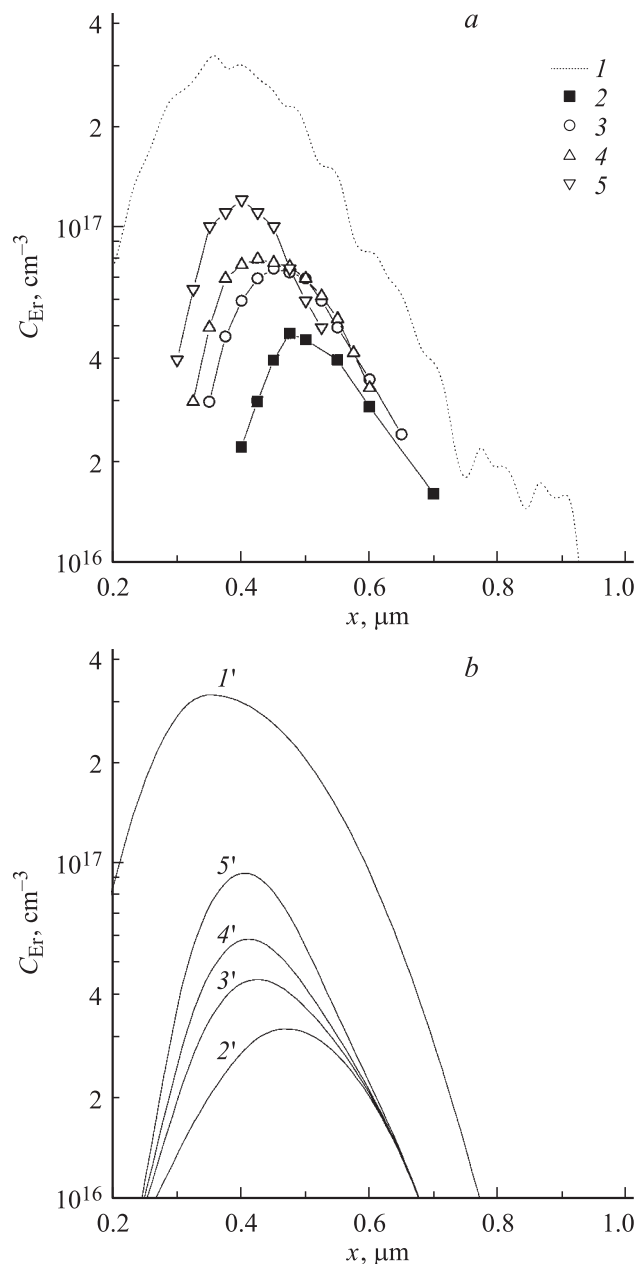


Рис. 2. Экспериментальные (a) и расчетные (b) концентрационные профили атомов Er C_{Er} (1 — данные вторичной ионной масс-спектрометрии, 1' — аппроксимация) и донорных центров C_a (2, 2'–5, 5'). Доза соимплантации ионов O^+ , cm^{-2} : 2, 2' — 0; 3, 3' — 10^{13} ; 4, 4' — $2 \cdot 10^{13}$; 5, 5' — $5 \cdot 10^{13}$. Температура отжига 800°С.

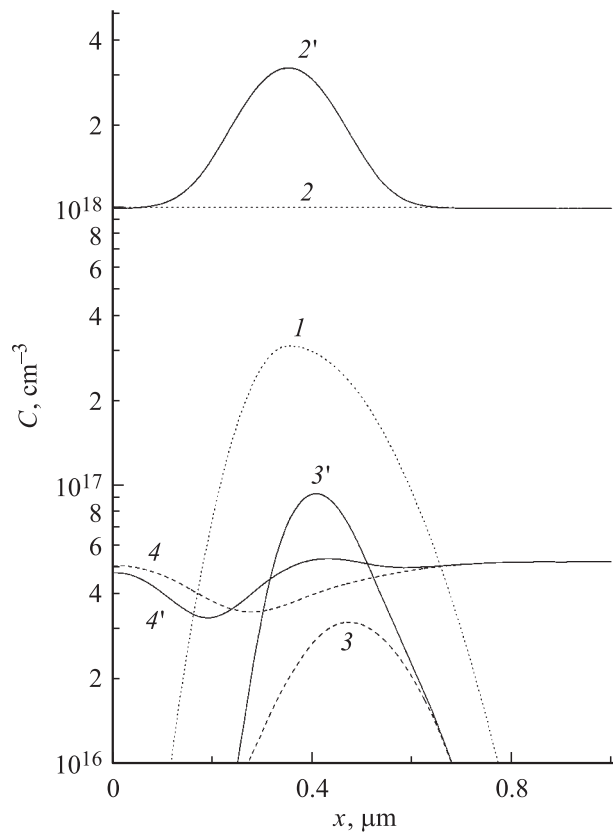


Рис. 3. Концентрационные профили атомов Er (1) и кислорода до отжига (2, 2'), донорных центров (3, 3') и атомов кислорода после отжига (4, 4'). Доза соимплантации ионов O^+ , cm^{-2} : 2–4 — 0, 2'–4' — $5 \cdot 10^{13}$. Температура отжига $800^\circ C$.

ления наблюдается сдвиг профиля донорных центров из области $x \gtrsim R_p$ к поверхности (рис. 2, а). На рис. 2, б показан расчет влияния соимплантации ионов O^+ на концентрационные профили распределения донорных центров после отжига при температуре $T = 800^\circ C$. Как видно из рисунка, расчет позволяет описать увеличение концентрации донорных центров в максимуме распределения с увеличением дозы ионов O^+ , а также сдвиг профиля донорных центров к поверхности, в область пробега ионов R_p . Сдвиг профиля донорных центров к поверхности связан с начальным (при $Q_{Ox} = 0$) положением профиля донорных центров за область R_p . Такое положение максимума донорных центров в рамках модели обусловлено наличием минимума распределения свободного кислорода в области нахождения радиационных центров кластеризации кислорода — при $x \simeq 0.7R_p$ в нашем случае (рис. 3). При соимплантации ионов кислорода O^+ область вблизи R_p становится источником свободного кислорода, поэтому профиль донорных центров смещается к этой области (см. рис. 2, 3).

В данной модели предполагается независимость энергии связи E_W от числа атомов кислорода n в комплексах ErO_n , что, по-видимому, является приближением модели. Как и для кислородных кластеров [18], для

эрбий-кислородных комплексов также можно ожидать немонотонной — с максимумом — зависимости энергии связи от числа атомов кислорода. В этом случае найденные значения энергии связи $E_W = 1.3$ эВ и частотного множителя $\nu_W = 2.5 \cdot 10^{15} s^{-1}$ являются эффективными и относятся в большей степени к комплексам с максимальной концентрацией, т.е. к комплексам с $n = 2-4$. В случае уменьшения энергии связи при больших значениях n можно ожидать усиления тенденции к насыщению зависимости коэффициента активации донорных центров от дозы соимплантации кислорода.

Отметим, что при температурах отжига свыше $900^\circ C$ активируется процесс диффузии эрбия в кремнии, и поэтому возможно образование комплексов, включающих несколько атомов Er, не учитывавшиеся в рассмотренной модели.

4. Заключение

Развита модель образования донорных центров в слоях кремния, имплантированных ионами Er^+ и O^+ . Предполагается, что донорными центрами являются комплексы ErO_n , включающие более трех атомов кислорода. Учитывается, что одновременно с образованием донорных центров в имплантированном слое происходит образование электрически неактивных кислородных кластеров AO_m на центрах кластерообразования, связанных со вторичными радиационными дефектами. Учет конкурирующего процесса образования кислородных кластеров позволяет описать насыщение коэффициента активации донорных центров при значениях, меньших единицы, и сдвиг профиля донорных центров к поверхности в область R_p при увеличении дозы имплантации ионов кислорода. Падение коэффициента активации с увеличением температуры отжига объясняется более высокой энергией связи атомов кислорода в комплексах ErO_n (1.3 эВ), чем в кластерах AO_m (0.89 эВ).

Работа частично поддержана РФФИ (грант № 04-02-16935).

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] F. Priolo, S. Coffa, G. Franzo, C. Spinella, A. Carnera, V. Bellani. *J. Appl. Phys.*, **74**, 4936 (1993).
- [4] N.A. Sobolev, A.M. Emel'yanov, Yu.A. Kudr'yavtsev, R.N. Kyutt, M.I. Makovijchuk, Yu.A. Nikolaev, E.O. Parshin, V.I. Sakharov, I.E. Serenkov, E.I. Shek, K.F. Shtel'makh. *Sol. St. Phenomena*, **57–58**, 213 (1997).
- [5] V.V. Emtsev, V.V. Emtsev, jr., D.S. Poloskin, E.I. Shek, N.A. Sobolev, J. Michel, L.C. Kimerling. ФТП, **33**, 1192 (1999).
- [6] V.V. Emtsev, jr., C.A.J. Ammerlaan, B.A. Andreev, G.A. Oganetsyan, D.S. Poloskin, E.I. Shek, N.A. Sobolev. *Sol. St. Phenomena*, **82–84**, 93 (2002).

- [7] O.V. Александров, A.O. Захарьин, N.A. Соболев, Е.И. Шек. Изв. СПбГЭТУ, вып. 516, 48 (1998).
- [8] D.L. Adler, D.C. Jacobson, D.J. Eaglesham, M.A. Marcus, J.L. Benton, J.M. Poate, P.H. Citrin. Appl. Phys. Lett., **61**, 2181 (1992).
- [9] A. Terrasi, G. Franzo, S. Coffa, F. Priolo, F. D'Acapito, S. Mobilio. Appl. Phys. Lett., **70**, 1712 (1997).
- [10] В.Ф. Мастеров, Ф.С. Насрединов, П.П. Сергеев, Е.И. Теруков, М.М. Мездрогина. ФТП, **32**, 708 (1998).
- [11] J.D. Carrey. J. Phys.: Condens. Matter., **14**, 8537 (2002).
- [12] U. Wahl, J.C. Correia, J.P. Araujo, A. Vantomme, G. Langouche. Physica B, **273–274**, 342 (1999).
- [13] O.V. Александров, A.O. Захарьин. ФТП, **36**, 1291 (2002).
- [14] T. Hallberg, J.L. Lindstrom. J. Appl. Phys., **72**, 5130 (1992).
- [15] H. Koyama. J. Appl. Phys., **51**, 3202 (1980).
- [16] V.V. Emtsev, jr., G.A. Oganesyanyan, K. Schmalz. Sol. St. Phenomena, **47–48**, 259 (1996).
- [17] R.C. Newman. J. Phys.: Condens. Matter., **12**, R335 (2000).
- [18] A. Ourmazd, W. Schroter, A. Bourret. J. Appl. Phys., **56**, 1670 (1984).
- [19] M. Suezawa, K. Sumino. Phys. Status Solidi, **82**, 235 (1984).
- [20] E. Chason, S.T. Picraux, J.M. Poate, J.O. Borland, M.I. Current, T.D. de la Rubia, D.J. Eaglesham, O.W. Holland, M.E. Law, C.W. Magee, J.W. Mayer, J. Melngailis, A.F. Tasch. J. Appl. Phys., **81**, 6513 (1997).
- [21] R. Krause-Rehberg, F. Borner, F. Redmann, J. Gebauer, R. Kogler, R. Klieman, W. Skorupa, W. Egger, G. Kogel, W. Triftshauser. Physica B, **308–310**, 442 (2001).
- [22] И.А. Аброян, А.Н. Андронов, А.И. Титов. *Физические основы электронной и ионной технологий* (М., Высш. шк., 1984).
- [23] A. Borghesi, B. Pivac, A. Sassela, A. Stella. J. Appl. Phys., **77**, 4169 (1995).
- [24] J.C. Mikkelsen. Matter. Res. Soc. Symp. Proc., **59**, 19 (1986).
- [25] 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).
- [26] W. Wijanarakula. Appl. Phys. Lett., **59**, 1185 (1991).

Редактор Т.А. Полянская

Influence of oxygen on the formation of donor centers in silicon layers implanted by erbium and oxygen ions

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

The St. Petersburg State
Electrotechnical University „LETI“,
197376 St. Petersburg, Russia
* Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract A model for the formation of donor centers conditioned co-implantation of Er⁺ and O⁺ ions in silicon and subsequent thermal annealing as well as representing multiparticle erbium-oxygen complexes ErO_n with $n \geq 4$ has been developed. A competing process of the formation of electrically inactive oxygen clusters has been taken into account. The model allows us to describe a dependence of the donor center activation coefficient on the oxygen ion implantation dose as well as an influence of oxygen ion implantation and annealing temperature on concentration profiles of donor centers.