

# РАСЧЕТ КОНЦЕНТРАЦИИ ВТОРИЧНЫХ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В КРЕМНИИ, ОБЛУЧЁННОМ ПОТОКОМ ПРОТОНОВ

Богатов Н.М., Коваленко М.С.

Кубанский государственный университет, г.Краснодар

*bogatov@phys.kubsu.ru*

*Рассчитаны численно зависимости концентраций вторичных радиационных дефектов от температуры облучения и концентрации примесей в кремнии, облучённом потоком протонов. Показано, что концентрации вторичных радиационных дефектов зависят от положения уровня Ферми в запрещённой зоне кремния, температуры облучения и определяются вероятностями взаимодействия первичных радиационных дефектов друг с другом и с атомами примесей.*

## Введение

Успехи в области микропроцессорной техники выдвигают задачу поиска и изучения возможностей создания миниатюрных сверхчувствительных датчиков электромагнитного излучения и сенсорных устройств. С этой целью необходим поиск новых материалов, в которых малые воздействия электромагнитного излучения, внешней среды могут вызывать существенные изменения комплекса свойств. Особый интерес представляют полупроводниковые структуры с наномасштабными неоднородностями.

В современной нанoeлектронике основное внимание уделяется исследованиям структур с квантовыми ямами и квантовыми точками [1]. Обзор способов получения материалов с наноразмерными объектами содержится в [2]. Создание наноразмерных областей разупорядочения воздействием ионизирующими частицами – метод, возможности которого полностью не изучены. Новые свойства структур на основе кремния с наноразмерными областями разупорядочения обсуждаются в [3]. Влияние наноразмерных областей разупорядочения на распределение электронных состояний в запрещенной зоне кремния рассматривается в [4].

Под действием ионизирующих частиц образуются вторичные радиационные дефекты (ВРД), относящиеся к классу точечных (А-центры, К-центры, дивакансии, Е-центры, комплексы Si<sub>i</sub>V и др.) и объемных (области разупорядочения). Кинетика радиационного дефектообразования в кремнии промоделирована в работе [5]. Образование вторичных радиационных дефектов – вероятностный процесс. Создание экспериментальных условий, обеспечивающих существенное превышение вероятности образования областей разупорядочения над вероятностью появления точечных ВРД, необходимо для контролируемого распределения областей разупорядочения в поверхностной области кремния.

Цель работы – рассчитать влияние температуры облучения, концентрации примесей и первичных радиационных дефектов на концентрацию ВРД в кремнии, выращенном методом Чохральского, облучённом потоком протонов.

## Образование вторичных радиационных дефектов

### под действием ионизирующих частиц

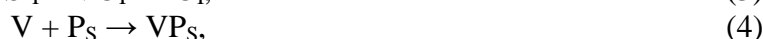
Процесс формирования ВРД описывается с помощью феноменологической системы уравнений квазихимических реакций [6]:

$$\frac{N_k(t)}{dt} = G'_k + \sum_{ij} K_{ij}^k N_i(t) N_j(t) - a_k N_k(t) \quad (1)$$

где  $t$  – время,  $N_k(t)$ ,  $N_i(t)$ ,  $N_j(t)$  – концентрация дефектов  $k$ -,  $i$ -,  $j$ -го типа соответственно;  $G'_k = G_k \cdot \varphi_0$  – объёмная скорость генерации дефектов  $k$ -го типа, образующихся в результате внешнего воздействия,  $G_k$  – линейная скорость генерации дефекта,  $k$ -го типа,  $\varphi_0$  –

интенсивность потока частиц;  $K_{ij}^k$  – коэффициент, характеризующий вероятность образования дефектов  $k$ -го типа в результате взаимодействия дефектов  $i$ -го и  $j$ -го типов;  $a_k$  – коэффициент, характеризующий вероятность диссоциации дефектов  $k$ -го типа или их исчезновение на стоках. Из формулы (1) видно, что концентрация ВРД определяется линейной скоростью генерации первичных радиационных дефектов (ПРД)  $G_k$ . Для расчёта концентраций ВРД использовалась модель образования ПРД изложенная в [7] и откорректированная с учётом температурных зависимостей вероятностей разделения заряженных и нейтральных пар Френкеля согласно [8].

В [7] выполнен анализ теоретических и экспериментальных данных, описывающих формирование ВРД. В результате выделены следующие основные уравнения квазихимических реакций образования ВРД:



где  $V$  – вакансия,  $O_I$  – междоузельный кислород,  $Si_I$  – междоузельный кремния,  $VO_I$  – А-центр,  $P_S$  – фосфор замещения,  $VP_S$  – Е-центр,  $B_S$  – бор замещения,  $C_S$  – углерод замещения,  $C_I$  – междоузельный углерод.

Уравнения вида (1) для реакций (2)-(7) сведены к следующей системе дифференциальных уравнений в [7]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dN_A}{dt} = \frac{G'_V(N_{O_I}^0 - N_K - N_A)}{(N_{O_I}^0 - N_K - N_A) + \gamma_{V,P/V,O}(N_{P_S}^0 - N_E)} - \\ \quad - \frac{G'_{Si} N_A}{N_A + \gamma_{Si,C/Si,A}(N_{C_S}^0 - N_K) + \gamma_{Si,B/Si,A}(N_{C_S}^0 - N_{Si_I B})}, \quad (8) \\ \frac{dN_E}{dt} = \frac{G'_V(N_{P_S}^0 - N_E)}{(N_{P_S}^0 - N_E) + \gamma_{V,P/V,O}^{-1}(N_{O_I}^0 - N_K - N_A)}, \quad (9) \\ \frac{dN_K}{dt} = \frac{G'_{Si}(N_{C_S}^0 - N_K)}{(N_{C_S}^0 - N_K) + \gamma_{Si,B/Si,C}(N_{B_S}^0 - N_{Si_I B}) + \gamma_{Si,C/Si,A}^{-1} N_A}, \quad (10) \\ \frac{dN_{Si_I B}}{dt} = \frac{G'_{Si}(N_{B_S}^0 - N_{Si_I B})}{(N_{B_S}^0 - N_{Si_I B}) + \gamma_{Si,B/Si,C}^{-1}(N_{C_S}^0 - N_K) + \gamma_{Si,B/Si,A}^{-1} N_A}, \quad (11) \end{array} \right.$$

где  $G'_{Si}$ ,  $G'_V$  – объёмные скорости генерации междоузельного кремния, вакансии соответственно [7];  $N_{P_S}^0$ ,  $N_{B_S}^0$ ,  $N_{C_S}^0$ ,  $N_{O_I}^0$  – начальные концентрации фосфора, бора, углерода и кислорода соответственно;  $N_A$ ,  $N_E$ ,  $N_K$ ,  $N_{Si_I B}$  – концентрации А-, Е-, К-центров и комплекса  $Si_I B$  соответственно,  $\gamma_{V,P/V,O} = 60$ ;  $\gamma_{Si,C/Si,A} = 0,1$ ;  $\gamma_{Si,B/Si,A} = 80$ ;  $\gamma_{Si,B/Si,C} = 800$  [7].

Для определения концентраций ВРД система уравнений (8)-(11) решалась численно с начальными условиями при  $t = 0$ :  $N_A(0) = N_K(0) = N_E(0) = N_{Si_I B}(0) = 0$ . Отрезок интегрирования  $t \in [0; t_\Phi]$ , где  $t_\Phi$  – время облучения. Концентрация дивакансий  $N_W$  рассчитывается как  $N_W = G_W \cdot \Phi_0 \cdot t_\Phi$ , где  $G_W$  – линейная скорость генерации дивакансий [7].

## Анализ температурных зависимостей концентраций вторичных радиационных дефектов

Рассмотрим температурные зависимости концентраций ВРД в n- и p-кремнии при постоянном потоке частиц  $\Phi = 10^{12} \text{ см}^{-2}$ , времени облучения  $t_\Phi = 27, 100, 500 \text{ с}$ , энергии налетающих протонов  $E_p = 25 \text{ МэВ}$  на температурном интервале  $T \in [80; 400] \text{ К}$ .

В случае n-кремния концентрации легирующих примесей фосфора  $N_{P_s}^0 = 6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  и бора  $N_{B_s}^0 = 0$ , а p-кремния  $N_{P_s}^0 = 0$  и  $N_{B_s}^0 = 6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . Для кремния, выращенного методом Чохральского, характерна высокая концентрация междоузельных атомов кислорода  $N_{O_I}^0 = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  и углерода замещения  $N_{C_S}^0 = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

Расчёт концентраций ВРД при облучении кремния n- и p-типа потоком протонов при  $\Phi = \Phi_0 \cdot t_\Phi = \text{const}$  и  $t_\Phi = 27, 100, 500$  показал, что концентрации ВРД не зависят от времени облучения как для n-кремния, так и для p-кремния.

Построим графики температурных зависимостей и проанализируем полученные результаты.

Рассмотрим кремний n-типа с начальной концентрацией электронов  $n = 6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ , облучённый протонами с энергией  $E_p = 25 \text{ МэВ}$  (рис. 1, 2 и 3). Температурная зависимость концентраций ВРД (зависимости 1 и 2 на рис. 1, 2) сильно выражена в диапазонах температур  $[80; 120] \text{ К}$  и  $[196; 400] \text{ К}$ . В интервале  $(120; 196) \text{ К}$  концентрация ВРД слабо зависит от температуры облучения. Форма температурных зависимостей концентраций ВРД определяется температурными зависимостями скоростей генерации ПРД (зависимости 1 и 2 на рис. 3).

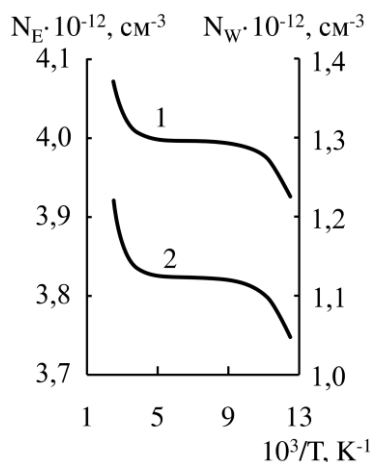


Рис. 1. Температурные зависимости концентраций ВРД в n-Si при  $E_p = 25 \text{ МэВ}$ :  
1 –  $N_E$ , 2 –  $N_W$

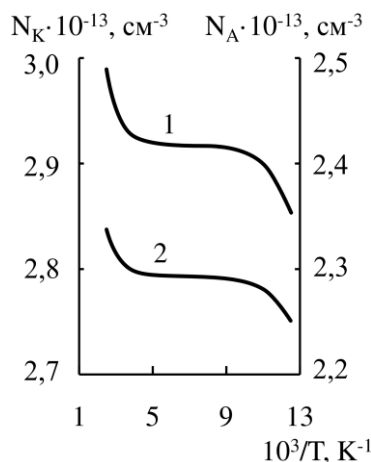


Рис. 2. Температурные зависимости концентраций ВРД в n-Si при  $E_p = 25 \text{ МэВ}$ :  
1 –  $N_K$ , 2 –  $N_A$

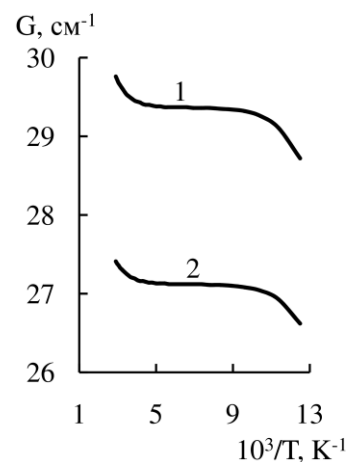


Рис. 3. Температурные зависимости скоростей генерации ПРД в n-Si при  $E_p = 25 \text{ МэВ}$ :  
1 –  $G_{Si}$ , 2 –  $G_V$

В рассматриваемом случае в n-кремнии концентрации ВРД соотносятся следующим образом:  $N_K > N_A > N_E > N_W$ , кроме того  $N_{Si_B} = 0$ , так как  $N_{B_s}^0 = 0$ . Приведённое соотношение концентраций ВРД объясняется следующим образом. К-центры образуются в результате взаимодействия  $Si_I$  и  $C_S$  (6) с образованием  $C_I$ , который в дальнейшем вступает в реакцию с  $O_I$  (7). Таким образом, концентрация К-центров зависит от  $N_{C_S}^0$  и  $N_{O_I}^0$ . Образование А- и Е- центров зависит от вероятности взаимодействия  $V$  с  $O_I$  и  $P_s$

соответственно. В рассматриваемом случае  $N_A > N_E$  так как  $N_{O_1}^0 > N_{P_S}^0$ . В результате рекомбинации  $Si_I$  на А-центре (2) снижается  $N_A$  и возрастает концентрация  $O_1$ , который при отсутствии  $V$  с высокой вероятностью взаимодействует с  $C_I$  (7). Если выполняются равенства  $N_{P_S}^0 = 0$  и  $G_{Si} = G_V$ , то  $N_K = N_A$ , а изменение концентраций  $O_1$  и  $\Delta C_S$  связано соотношением  $\Delta N_{O_1} = 2\Delta N_{C_S}$  [9]. В рассматриваемом случае часть вакансий взаимодействует с атомами  $P_S$ , кроме того  $G_{Si} > G_V$  (рис. 3), так как на стадии образования ПРД вакансии участвуют в формировании областей разупорядочения и дивакансий. Таким образом, в кремнии n-типа  $N_K > N_A$ .

Рассмотрим кремний р-типа с начальной концентрацией дырок  $p = 6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ , облучённый протонами с энергией  $E_p = 25 \text{ МэВ}$  (рис. 4, 5, 6). Увеличение температуры облучения приводит к росту концентраций всех типов ВРД. Зависимость концентраций ВРД от температуры облучения сильно выражена в интервале [200; 400] К. При температуре облучения от 80 до 200 К концентрация ВРД изменяется слабо. Форма температурных зависимостей концентраций ВРД в р-кремнии при облучении протонами определяется температурными зависимостями скоростей генерации ПРД (зависимости 1 и 2 на рис. 6).

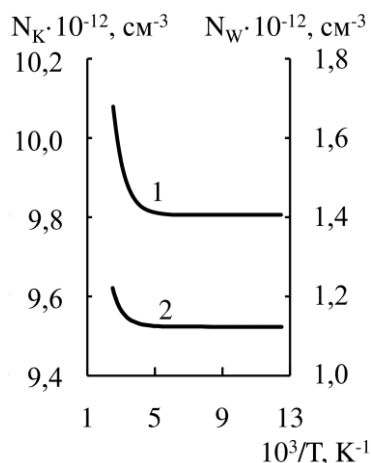


Рис. 4. Температурные зависимости концентраций ВРД в р-Si при  $E_p = 25 \text{ МэВ}$ : 1 –  $N_K$ , 2 –  $N_W$

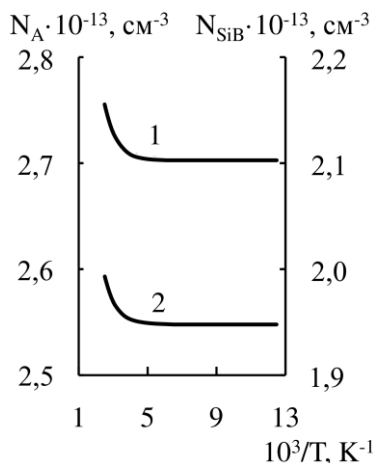


Рис. 5. Температурные зависимости концентраций ВРД в р-Si при  $E_p = 25 \text{ МэВ}$ : 1 –  $N_A$ , 2 –  $N_{SiB}$

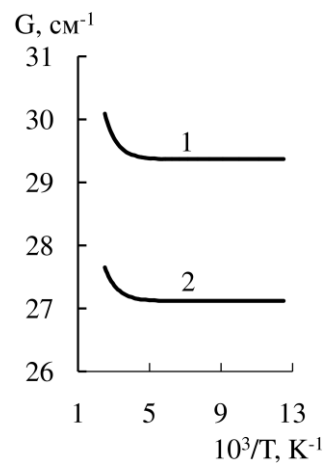


Рис. 6. Температурные зависимости скоростей генерации ПРД в р-Si при  $E_p = 25 \text{ МэВ}$ : 1 –  $G_{Si}$ , 2 –  $G_V$

В рассматриваемом случае (рис. 4, 5)  $N_{P_S}^0 = 0$ , поэтому  $N_E = 0$ . Как следует из зависимостей на рисунках 4, 5, соотношение концентраций ВРД в рассматриваемом материале:  $N_A > N_{SiB} > N_K > N_W$ . Это обусловлено тем, что в р-кремнии без примесей фосфора вакансии участвуют в реакциях образования А-центров, а междоузельный кремний – в реакциях образования К-центров и комплексов  $Si_I B$ . В рассматриваемом случае  $N_{O_1}^0 > N_{B_S}^0$ , поэтому  $N_A > N_{SiB}$ . Междоузельный кремний  $Si_I$  может вступить во взаимодействие с  $C_S$  (6) и  $B_S$  (5). В силу соотношения  $\gamma_{Si,B/Si,C} = 800$ , более вероятно протекание реакции с образованием комплекса  $Si_I B$  **Ошибка! Источник ссылки не найден.**, чем реакции (6). Следовательно, при заданных начальных значениях концентрации примесей  $N_{SiB} > N_K$ .

Скорость генерации дивакансий  $G_W \ll G_{Si}$ ,  $G_W \ll G_V$ , поэтому при заданных начальных значениях концентрации примесей и потоке частиц  $\Phi$  концентрация дивакансий меньше концентрации остальных ВРД, как в кремнии n-типа, так и в кремнии р-типа.

## Анализ зависимостей концентраций вторичных радиационных дефектов от концентраций примесей

Рассмотрим зависимости концентраций А-, Е-, К-центров, комплекса Si<sub>1</sub>V и дивакансий от концентраций примесей фосфора, бора, кислорода и углерода.

В расчётах задавались следующие постоянные параметры:  $T = 300$  К,  $t_{\Phi} = 100$  с,  $\Phi_0 = 10^{12}$  см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>,  $\Phi = 10^{14}$  см<sup>-2</sup>,  $E_p = 25$  МэВ.

Для расчёта зависимостей  $N_A(N_{P_s}^0)$ ,  $N_E(N_{P_s}^0)$ ,  $N_K(N_{P_s}^0)$ ,  $N_W(N_{P_s}^0)$ ,  $N_{SiB}(N_{P_s}^0)$  концентрация  $N_{P_s}^0$  изменялась в пределах  $N_{P_s}^0 \in [10^{11}; 10^{19}]$  см<sup>-3</sup> при постоянных значениях  $N_{B_s}^0 = 6 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup>,  $N_{O_1}^0 = 2 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>,  $N_{C_s}^0 = 2 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>. Проанализируем результаты расчётов, представленные на рисунке 7. Высокая концентрация К-центров (зависимость 1) достигается в результате взаимодействия Si<sub>1</sub> и C<sub>s</sub> с образованием C<sub>1</sub> (6), C<sub>1</sub> взаимодействует с O<sub>1</sub> с образованием К-центра (7). Кроме того, O<sub>1</sub> взаимодействует с вакансией V с образованием А-центра (2). Неравенство  $N_K > N_A$  выполняется в кремнии n-типа, как показано выше. Падение концентрации А-центров и увеличение концентрации Е-центров в области  $N_{P_s}^0 \in [10^{13}; 10^{17}]$  см<sup>-3</sup> обусловлено тем, что с ростом  $N_{P_s}^0$  увеличивается вероятность участия V в реакции (4) и снижается в реакции (2). Падение концентраций  $N_K$ ,  $N_E$ ,  $N_W$  при  $N_{P_s}^0 > 10^{17}$  см<sup>-3</sup> связано со снижением  $G_{Si}$  и  $G_V$  (рис. 8). Снижение  $G_{Si}$  и  $G_V$  при  $N_{P_s}^0 > 10^{17}$  см<sup>-3</sup> обусловлено уменьшением вероятности разделения несвязанных пар Френкеля  $\omega_d$  [8] (рис. 8, зависимость 2), вследствие повышения уровня Ферми в запрещённой зоне кремния, зависящего от концентрации ионизованных примесей.

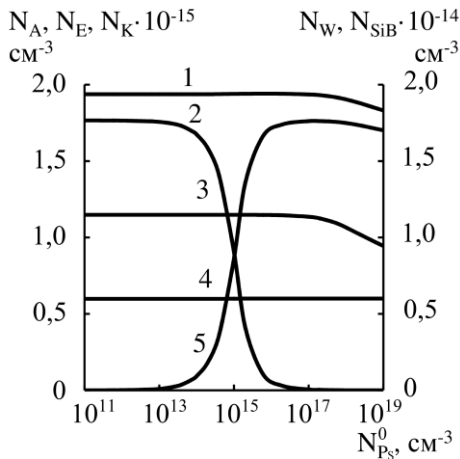


Рис. 7. Зависимости концентраций А-, Е-, К-центров, комплекса Si<sub>1</sub>V и дивакансии от  $N_{P_s}^0$ :

1 –  $N_K$ , 2 –  $N_A$ , 3 –  $N_W$ , 4 –  $N_{SiB}$ , 5 –  $N_E$

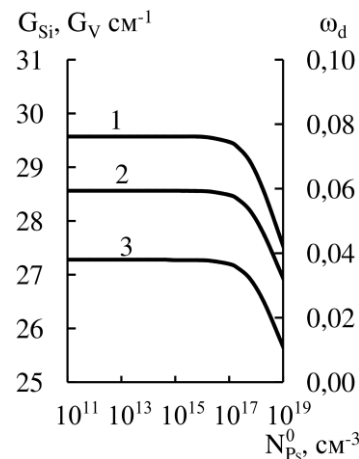


Рис. 8. Зависимости скоростей генерации Si<sub>1</sub> и V и соответствующей  $\omega_d$  от  $N_{P_s}^0$ : 1 –  $G_{Si}$ , 2 –  $\omega_d$ , 3 –  $G_V$

Для расчёта зависимостей  $N_A(N_{B_s}^0)$ ,  $N_E(N_{B_s}^0)$ ,  $N_K(N_{B_s}^0)$ ,  $N_W(N_{B_s}^0)$ ,  $N_{SiB}(N_{B_s}^0)$  концентрация  $N_{B_s}^0$  изменялась в пределах  $N_{B_s}^0 \in [10^{11}; 10^{19}]$  см<sup>-3</sup> при постоянных значениях  $N_{P_s}^0 = 6 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup>,  $N_{O_1}^0 = 2 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>,  $N_{C_s}^0 = 2 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>. Проанализируем результаты расчётов, представленные на рисунке 9. В области  $N_{B_s}^0 \in [10^{11}; 10^{16}]$  см<sup>-3</sup> наблюдается рост  $N_{SiB}$ , обусловленный увеличением концентрации  $N_{B_s}^0$ . Снижение  $N_K$  при  $N_{B_s}^0 > 10^{13}$  см<sup>-3</sup>

обусловлено увеличением вероятности взаимодействия  $Si_I$  с  $B_S$  с образованием комплекса  $Si_I B$  (5) и снижением вероятности взаимодействия  $Si_I$  с  $C_S$  (6) с образованием атома  $C_I$ , который в дальнейшем при взаимодействии с  $O_I$  образует К-центр (7). Уменьшение концентрации кислородосодержащих К-центров (7) сопровождается увеличением концентрации кислородосодержащих А-центров (7), так как возрастает вероятность взаимодействия  $V$  и  $O_I$ . В рассматриваемом случае концентрации ВРД не зависят от положения уровня Ферми, поскольку в р-кремнии не зависят от него линейные скорости генерации  $G_{Si}$  и  $G_V$ . Небольшое увеличение  $N_E$  обусловлено приближением к максимальному значению  $N_E = N_{P_S}^0 = 6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ .

Для расчёта зависимостей  $N_A(N_{C_S}^0)$ ,  $N_E(N_{C_S}^0)$ ,  $N_K(N_{C_S}^0)$ ,  $N_W(N_{C_S}^0)$ ,  $N_{SiB}(N_{C_S}^0)$  концентрация  $N_{C_S}^0$  изменялась в пределах  $N_{C_S}^0 \in [10^{15}; 3 \cdot 10^{17}] \text{ см}^{-3}$ , а  $N_{B_S}^0$ ,  $N_{P_S}^0$ ,  $N_{O_I}^0$  задавались постоянными  $N_{B_S}^0 = 6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ,  $N_{P_S}^0 = 6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ,  $N_{O_I}^0 = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Проанализируем результаты расчётов, представленные на рисунке 10. С ростом концентрации углерода увеличивается вероятность взаимодействия  $Si_I$  и  $C_S$  с образованием  $C_I$  (6), который участвует в реакции образования К-центра (7). Кроме того, рост вероятности взаимодействия  $Si_I$  и  $C_S$  снижает вероятность процесса не прямой рекомбинации  $Si_I$  на А-центре (3), поэтому возрастает  $N_A$ . Увеличение  $N_K$  и  $N_A$  означает уменьшение концентрации междоузельного кислорода  $N_{O_I} = N_{O_I}^0 - N_K - N_A$ , тогда из уравнения (9) следует увеличение концентрации Е-центров  $N_E$ . С увеличением  $N_{C_S}^0$  концентрация  $N_E$  приближается к максимальному значению  $N_E = N_{P_S}^0 = 6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . Концентрация комплексов  $Si_I B$  не изменяется и равна максимальному значению  $N_{B_S}^0 = 6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ , что обусловлено значениями констант  $\gamma_{Si,B/Si,A}$ ,  $\gamma_{Si,B/Si,C}$  в уравнении (11).

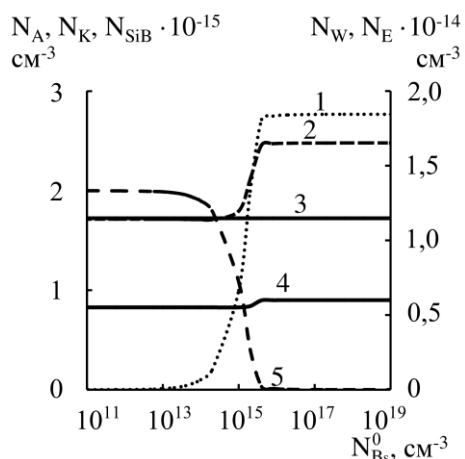


Рис. 9. Зависимости концентраций А-, Е-, К-центров, комплекса  $Si_I B$  и дивакансии от  $N_{B_S}^0$ : 1 –  $N_{SiB}$ , 2 –  $N_A$ , 3 –  $N_W$ , 4 –  $N_E$ , 5 –  $N_K$

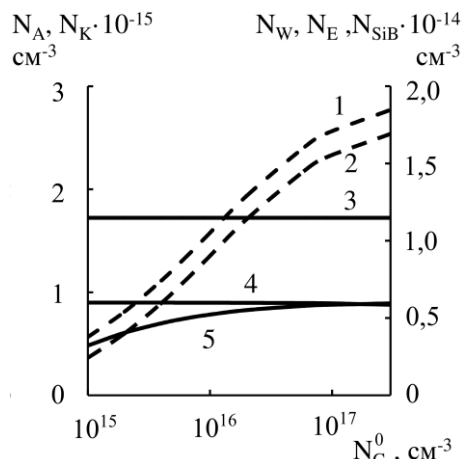


Рис. 10. Зависимости концентраций А-, Е-, К-центров, комплекса  $Si_I B$  и дивакансии от  $N_{C_S}^0$ : 1 –  $N_K$ , 2 –  $N_A$ , 3 –  $N_W$ , 4 –  $N_{SiB}$ , 5 –  $N_E$

Для расчёта зависимостей  $N_A(N_{O_I}^0)$ ,  $N_E(N_{O_I}^0)$ ,  $N_K(N_{O_I}^0)$ ,  $N_W(N_{O_I}^0)$ ,  $N_{SiB}(N_{O_I}^0)$  концентрация  $N_{O_I}^0$  изменялась в пределах  $N_{O_I}^0 \in [2 \cdot 10^{16}; 10^{19}] \text{ см}^{-3}$  при постоянных  $N_{B_S}^0 = 6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ,  $N_{P_S}^0 = 6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ,  $N_{C_S}^0 = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . В этом случае время облучения увеличено до  $t_{\Phi} = 1000 \text{ с}$ . Проанализируем результаты расчётов, представленные на рисунке 11. При заданных параметрах облучения и начальных концентрациях примесей

количество  $\text{Si}_i$ ,  $V$ , созданных ионизирующими частицами в единице объема за все время облучения  $t_\Phi$ , соответственно, равно  $G_{\text{Si}_i} \cdot \Phi = 2,96 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ,  $G_V \cdot \Phi = 2,73 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Сумма начальных концентраций  $N_{\text{Cs}}^0 + N_{\text{Bs}}^0 < G_{\text{Si}_i} \cdot \Phi$ , поэтому концентрации К-центров и комплексов  $\text{Si}_iV$  достигают постоянных значений, при этом максимальное значение  $N_{\text{SiB}} = N_{\text{Bs}}^0 = 6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . Рост  $N_{\text{O}_i}^0$  приводит к снижению  $N_E$ , так как увеличивается вероятность взаимодействия  $V$  и  $\text{O}_i$  с образованием А-центров (2). Концентрация А-центров  $N_A < G_V \cdot \Phi$  вследствие не прямой рекомбинации  $\text{Si}_i$  на А-центрах (3), по этой же причине  $N_K < N_{\text{Cs}}^0$ . Концентрация дивакансий  $N_W$  не зависит от  $N_{\text{O}_i}^0$ ,  $N_{\text{Cs}}^0$ .

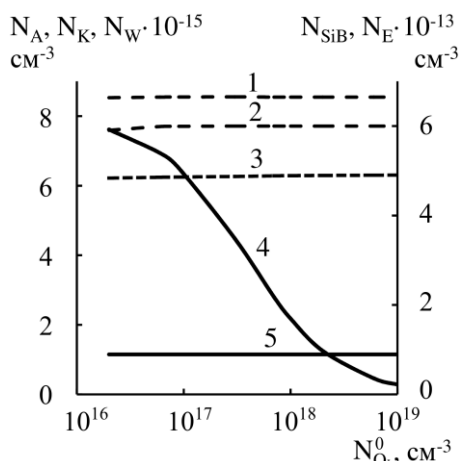


Рис. 11. Зависимости концентраций А-, Е-, К-центров, комплекса  $\text{Si}_iV$  и дивакансии от  $N_{\text{O}_i}^0$ : 1 –  $N_K$ , 2 –  $N_{\text{SiB}}$ , 3 –  $N_A$ , 4 –  $N_E$ , 5 –  $N_W$

### Заключение

Таким образом, концентрации ВРД зависят от температуры облучения. Для кремния  $n$ -типа данная зависимость сильно выражена в двух температурных интервалах:  $[80; 120]$  К и  $[196; 400]$  К. В интервале  $(120; 196)$  К концентрация ВРД слабо изменяется при изменении температуры облучения. В кремнии  $p$ -типа рассматриваемая зависимость сильно выражена в единственном интервале  $[200; 400]$  К, а в  $[80; 200]$  К практически не наблюдается. Температурные зависимости линейных скоростей генерации ПРД определяют характер температурных зависимостей скоростей генерации ВРД в интервале  $T \in [80; 400]$  К. Изменение времени облучения кремния при постоянном флюенсе и температуре не влияет на значения концентрации ВРД. Зависимость концентрации ВРД от начальной концентрации легирующих примесей достаточно сложна, определяется совокупностью конкурирующих процессов взаимодействия ПРД с примесями и ВРД, а так же положением уровня Ферми в запрещенной зоне кремния.

### Литература

1. Нанoeлектроника. Часть 1. Введение в нанoeлектронику / под. ред. Орликовского А.А. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 720 с.
2. Суздалев, И.П. Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов. – М.: КомКнига, 2006. – 592 с.
3. Богатов, Н.М. Кремний с наноразмерными областями разупорядочения / Н.М. Богатов, М.С. Коваленко // Современные наукоёмкие технологии. 2008. №2. С. 109-110.

4. *Богатов, Н.М.* Расчет плотности электронных состояний наноразмерных областей разупорядочения, созданных ионизирующими частицами в кремнии / *Н.М. Богатов, М.С. Коваленко* // Новые технологии. – 2011. – №6. – С. 8-14.
5. *Богатов, Н.М.* Моделирование кинетики радиационного дефектообразования в кремнии, легированном литием / *Н.М. Богатов, М.С. Коваленко* // Известия высших учебных заведений. Северо-кавказский регион. Естественные науки. – 2007. – №1. – С. 34-40.
6. *Кузнецов, Н.В.* Радиационная стойкость кремния / *Н.В. Кузнецов, Г.Г. Соловьев.* – Москва: Энергоатомиздат, 1989. – 96 с.
7. *Богатов, Н.М.* Радиационные дефекты в кремнии, выращенном методом Чохральского / *Н.М. Богатов* // Поверхность. – 1999. – № 3.– С. 72-78.
8. *Богатов, Н.М.* Моделирование разделения пар Френкеля, образовавшихся в кремнии в результате облучения потоком ионизирующих частиц / *Н.М. Богатов, М.С. Коваленко* // Современные проблемы физики, биофизики и инфокоммуникационных технологий : материалы Всероссийской заочной научно-практической конференции, 29 июня 2012г. – Краснодар: Краснодарский ЦНТИ, 2012. – С. 233-240.
9. *Холодарь, Г.А.* Непрямая рекомбинация вакансий и межузельных атомов в облучаемом кремнии / *Г.А. Холодарь, Ю.И. Данковский, В.В. Конопляный, В.Л. Винецкий* // ФТП . – 1976. – Т. 10. – В. 9. – С. 1712-1718.