

## ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЕ В КРЕМНИИ, ОБЛУЧЕННОМ ЧАСТИЦАМИ С МАССОЙ $\sim 100$ а. е. м. И ЭНЕРГИЕЙ ДО 100 МэВ

### II. ИЗМЕНЕНИЕ РЕКОМБИНАЦИОННЫХ СВОЙСТВ

Баранов И. А., Кучинский П. В., Ломако В. М.,  
Петрунин А. П., Цепелевич С. О., Шахлевич Л. Н.

Изучено влияние дефектов, вводимых облучением осколками деления  $^{252}\text{Cf}$  в кремнии с уровнем легирования  $10^{14} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , на рекомбинацию неосновных носителей заряда. Показано, что изменение времени жизни носителей при облучении определяется в основном введением областей скопления дефектов. С использованием параметров для областей скопления дефектов, полученных из данных емкостной спектроскопии, описана зависимость поведения коэффициента радиационного изменения времени жизни неосновных носителей заряда от уровня легирования.

В первой части настоящей работы представлены результаты по спектроскопии дефектов, образующихся в кремнии при облучении осколками деления (ОД)  $^{252}\text{Cf}$  — тяжелыми заряженными частицами с энергией  $\sim 100$  МэВ [1]. Показано, что в этом случае эффективно генерируются крупные структурные нарушения — области скопления дефектов (ОСД). Сделаны оценки их параметров: размера, числа дефектов в них, эффективности образования.

Процесс деления  $^{252}\text{Cf}$  сопровождается эмиссией нейтронов ( $\sim 3.8$  нейтрона на акт деления) со средней энергией  $2 - 3$  и  $\alpha$ -частиц ( $\sim 15$   $\alpha$ -частиц на ОД) с энергией  $6.1$  МэВ. Однако, как следует из оценки, проведенной в первой части работы, эффективность введения смещений ОД составляет  $\sim 10^7 \text{ см}^{-1}$ , что существенно выше этой величины при облучении нейтронами ( $\sim 10^2 \text{ см}^{-1}$ ) или  $\alpha$ -частицами ( $\sim 10^5 \text{ см}^{-1}$ ). Отсюда следует, что изменение электрофизических параметров кремния будет обусловлено в основном осколками деления.

При облучении ОД, помимо сложных нарушений, генерируются также изолированные дефекты. Априори не очевидно, что при облучении ОД изменение электрофизических свойств кремния будет определяться введением ОСД [2]. С другой стороны, на сегодняшний день недостаточно изучено в силу сложности взаимодействия неравновесных носителей заряда с областями скопления дефектов.

В связи с указанным в данной работе проведено исследование изменения рекомбинационных свойств кремния при облучении осколками деления  $^{252}\text{Cf}$ . Полученные результаты сопоставляются с изменением времени жизни носителей заряда при облучении  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$ , электронами ( $7$  МэВ),  $\alpha$ -частицами ( $4.7$  МэВ) и быстрыми реакторными нейтронами.

Измерения проводились на  $p$ - $n$ -структурах на основе  $n$ - и  $p$ -кремния с удельным сопротивлением  $0.1 - 20 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ . Толщина эмиттерной области составляла  $2 - 3$  мкм. Облучение ОД проводилось коллимированным пучком ( $\alpha \approx \pm 4^\circ$ ) со стороны эмиттера при  $300 \text{ К}$ . Интенсивность потока частиц составляла  $\sim 5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}/\text{с}$ . Регистрация осколков деления производилась с помощью поверхностно-барьерных  $\text{Au-Si}$ -детекторов, имеющих  $100\%$ -ю эффективность регистрации осколков с хорошим спектральным разделением их от сопутствующих  $\alpha$ -частиц. Измерение времени жизни неосновных носителей заряда

(ННЗ) в базовой области  $p-n$ -структур проводилось по переходным характеристикам при переключении.

Как было показано в первой части работы [1], в облученных ОД образцах наблюдаются два перекрывающихся пика повреждений с максимумами на глубинах 7.3 и 9.3 мкм, что связано с торможением тяжелых и легких осколков. В начале пробега ( $X < 3$  мкм) и на его конце ( $X > 13$  мкм) концентрация дефектов на порядок ниже, чем в области 5–11 мкм. Соответственно при  $L_{n,p} > R$  (где  $L_{n,p}$  — диффузионная длина носителей заряда,  $R$  — длина пробега осколков деления) наблюдается суперлинейная зависимость изменения времени жизни ННЗ  $\Delta$  ( $\tau^{-1}$ ) с потоком облучения  $\Phi$  [3]. При  $L_{n,p} \ll R$ , как видно из рис. 1, хорошо выполняется характерная для однородного распределения дефектов зависимость

$$\tau^{-1} = \tau_0^{-1} + k_\tau \Phi, \quad (1)$$

где  $\tau_0$  — начальное значение времени жизни ННЗ,  $k_\tau$  — коэффициент радиационного изменения времени жизни носителей.

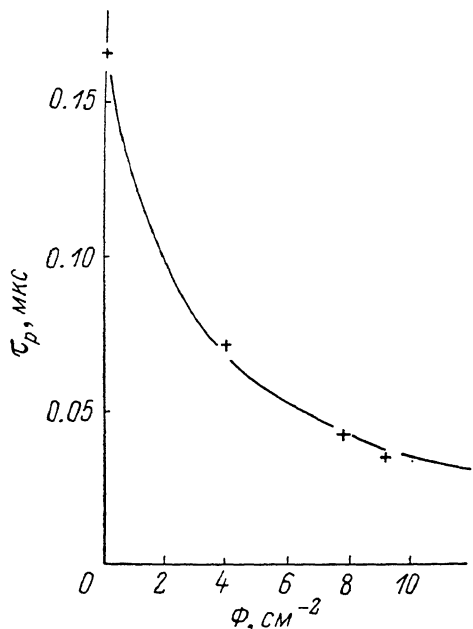


Рис. 1. Изменение времени жизни ННЗ в базовой области  $p-n$ -структуры (КЭФ-2) с потоком осколков деления  $^{252}\text{Cf}$ .

Точки — эксперимент, линия — расчетная зависимость в соответствии с (1) при  $k_\tau = 2.2 \cdot 10^{-1} \text{ см}^2/\text{с}$ .

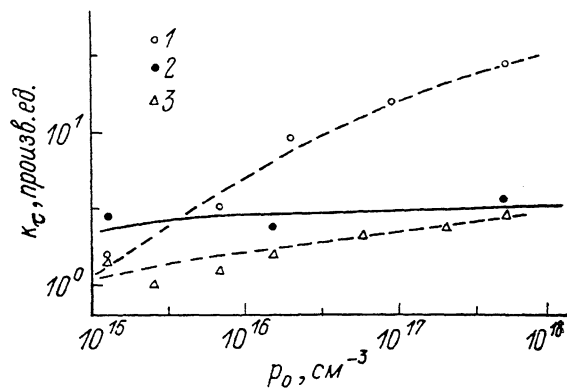


Рис. 2. Зависимость  $k_\tau$  от уровня легирования  $p$ -кремния при облучении  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  (1), осколками деления (2) и нейтронами (3) [при  $p_0 = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ;  $k_\tau^I (k_\tau^I)^{-1} = 10^{-5}$ ;  $k_\tau^I (k_\tau^{\text{OD}})^{-1} = 6 \cdot 10^{-11}$ ].

Штриховые линии — экспериментальные зависимости, сплошная — расчет.

Большая скорость введения дефектов при облучении ОД ( $\sim 10^5 \text{ см}^{-1}$ ) приводит к эффективному уменьшению времени жизни носителей. Для  $n$ -кремния ( $n_0 \approx 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ) величина  $k_\tau$  составляет  $2.2 \cdot 10^{-1} \text{ см}^2/\text{с}$  при 300 К и уровни возбуждения  $\gamma = \Delta p n_0^{-1} = 5 \cdot 10^{-2}$ .

Наличие потенциального барьера, окружающего ОСД, способствует усилению эффективности захвата неосновных носителей заряда. Сказанное подтверждается данными, полученными для рекомбинационной активности радиационных дефектов, которую определим как  $k_\tau (\sum_i \delta N_i)^{-1}$  (где  $\sum_i \delta N_i$  — суммарная скорость введения дефектов). В таблице представлена указанная величина для  $n$ -кремния ( $n_0 = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ) при различных видах облучения (где  $\sum_i \delta N_i$  — сумма скоростей введения  $A$ -,  $E$ -центров и дивакансии). Видно, что введение ОСД при облучении быстрыми нейтронами приводит к возрастанию величины  $k_\tau (\sum_i \delta N_i)^{-1}$  на порядок по сравнению с видами облучения, генерирующими в основном изолированные комплексы дефектов. Как видно из таблицы, процессы рекомбинации при облучении кремния осколками деления в значительной мере определяются введением ОСД.

Наличие потенциального барьера на границе матрица—ОСД приводит к различию концентрационных зависимостей  $k_\tau = f(n_0, p_0)$ , где  $n_0, p_0$  — концентрация

равновесных носителей, при введении изолированных дефектов и областей скопления. На рис. 2 представлены результаты исследования зависимости  $k_{\tau}(p_0)$  при облучении  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$ , быстрыми нейтронами реактора и осколками деления. Аналогичные зависимости имеют место и для  $n$ -кремния. Поведение  $k_{\tau}(p_0)$  при введении изолированных дефектов и уровне возбуждения  $\gamma \approx 10^{-2}$  описано в работе [4]. В указанной работе с учетом данных по эффективности введения центров, их рекомбинационным свойствам наблюдаемый рост  $k_{\tau}$  с уровнем легирования описан в рамках модели рекомбинации Холла—Шокли—Рида и обусловлен изменением заполнения центров рекомбинации и их скоростей введения. Отличительной особенностью поведения  $k_{\tau}(p_0)$ , когда процессы рекомбинации ННЗ определяются введением ОСД, является его слабая зависимость от уровня легирования. С учетом параметров для ОСД, полученных в первой части работы, в рамках модели для рекомбинации ННЗ на дефектах в ОСД, предложенной в [5], нами проведен расчет зависимости  $k_{\tau}$  от уровня легирования при облучении осколками деления. В этом случае для  $k_{\tau}$  имеет место выражение

$$k_{\tau} = \delta N_{\text{ОСД}} V_r N_{tr} c_p f(E_{tr}, F, \gamma) \exp\left[\frac{\psi(f)}{kT}\right], \quad (2)$$

где  $E_{tr}$  — энергетическое положение центра рекомбинации,  $\delta N_{\text{ОСД}}$  — эффективность образования ОСД,  $\psi(f)$  — потенциальный барьер на границе матрица—ОСД,  $f(E_{tr}, F, \gamma)$  — функция заполнения дефектов в ОСД,  $V_r = 4/3 \pi r_1^3$  — объем области скопления дефектов,  $c_p = v_p \sigma_p$  — коэффициент захвата дырок.

Высота потенциального барьера области скопления связана с функцией заполнения дефектов  $f$  уравнением

$$\psi(f) = \frac{2\pi e^2}{\epsilon kT} r_1^2 N_{tr} f^{-1/3},$$

а функция заполнения дефектов в ОСД определяется уравнением

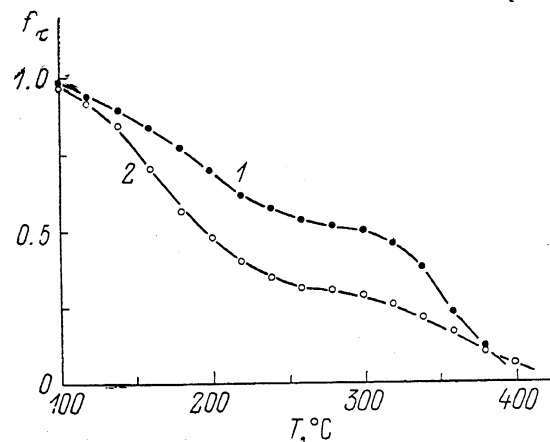


Рис. 3. Изохронный отжиг рекомбинационных центров в  $n$ -кремнии, облученном осколками деления (1) и нейтронами (2).

$$f^{-1} = 1 + \exp\left(\frac{E_{tr} - F}{kT}\right) \exp\left(\frac{2\pi e^2}{\epsilon kT} r_1^2 N_{tr} f^{-1/3}\right) + \gamma \frac{c_n}{c_p} \exp\left(\frac{4\pi e^2}{\epsilon kT} r_1^2 N_{tr} f^{-1/3}\right),$$

где  $F$  — положение уровня Ферми,  $c_n = v_n \sigma_n$  — коэффициент захвата для электронов.

Предполагалось, что основным рекомбинационным центром в области скопления является дивакансия. В этом случае, как следует из первой части работы, для  $p$ -кремния  $E_{tr} = E_v + 0.21$  эВ,  $N_{tr} \approx 10^{18}$  см $^{-3}$ ,  $r_1 \approx 1.3 \cdot 10^{-5}$  см,  $\delta N_{\text{ОСД}} \approx 10^3$  см $^{-1}$ . Расчет проводился при уровне возбуждения  $\gamma = 10^{-2}$ , что соответствует экспериментальным значениям, представленным на рис. 2. Удовлетворительное согласие расчетных и экспериментальных зависимостей  $k_{\tau}(p_0)$  удастся получить при  $c_p c_n^{-1} = 0.2$  и  $\sigma_p = 2.0 \cdot 10^{-15}$  см $^2$ . Видно, что указанные значения для сечений захвата носителей близки к полученным в [4] при описании рекомбинации на изолированных дивакансиях. В случае облучения нейтронами приведенная модель рекомбинации ННЗ на дефектах в областях скопления удовлетворительно описывает полученные результаты при параметрах областей

Вид облучения	$k_{\tau} (\sum \delta N_i)^{-1}$ , отн. ед.
$\gamma$ - $^{60}\text{Co}$	4.7
$e^{-1}$ (7 мэВ)	4.9
$\alpha$ (4.7 МэВ)	5.1
$n^0$ (реакт.)	37
ОД $^{252}\text{Cf}$	18

$\partial N_{\text{ОСД}} = 0.16 \text{ см}^{-1}$ ,  $N_{tr} = 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ,  $r_1 = 1.5 \cdot 10^{-6} \text{ см}$ , которые экспериментально подтверждены.

Свидетельством того, что рекомбинация носителей заряда в кремнии, облученном осколками деления, в значительной мере определяется дефектами, локализованными в областях скоплений, является характер восстановления времени жизни носителей при изохронном отжиге (рис. 3). Как видно из рисунка, наблюдается корреляция между характером отжига дефектов, определяющих изменение времени жизни носителей при облучении нейтронами и осколками деления. В первой части работы отмечалось, что для дивакансий наблюдается бесструктурная стадия отжига в области  $100\text{--}300 \text{ }^\circ\text{C}$ . Сравнение указанных результатов с характером отжига  $\tau$  позволяет заключить, что бесструктурная стадия восстановления времени жизни носителей заряда в области  $100\text{--}200 \text{ }^\circ\text{C}$  может быть обусловлена отжигом дивакансий, локализованных в ОСД.

Полученные результаты позволяют заключить, что изменение времени жизни неосновных носителей заряда в кремнии при облучении тяжелыми заряженными частицами ( $M \sim 100 \text{ а. е. м.}$ ) с энергией  $\sim 100 \text{ МэВ}$  определяется в основном введением областей скоплений дефектов. Использование параметров ОСД, полученных из данных по спектроскопии дефектов, позволяет удовлетворительно описать изменение рекомбинационных свойств материала при облучении осколками деления.

#### Список литературы

- [1] Баранов И. А., Кучинский П. В., Ломако В. М., Петрунин А. П., Цепелевич С. О., Шахлевич Л. Н. // ФТП. 1990. Т. 24. В. 4. С. 731—735.
- [2] Кучинский П. В., Ломако В. М. // Матер. VIII Всес. конф. «Взаимодейств. атомн. частиц с твердым телом». М., 1987. С. 168—170.
- [3] Кучинский П. В., Ломако В. М., Петрунин А. П. // ЖТФ. 1984. Т. 54. В. 10. С. 2066—2068.
- [4] Kuchinskii P. V., Lomako V. M. // Sol. St. Electron. 1986. V. 29. N 10. P. 1041—1051.
- [5] Крамер-Агеев Е. А., Миронов Ю. А. // Влияние ионизирующих излучений на свойства диэлектриков и полупроводников. М., 1979. В. 1. С. 85—92.

Научно-исследовательский институт  
прикладных физических проблем  
им. А. Н. Севченко при БГУ им. В. И. Ленина  
Минск

Получена 9.03.1989  
Принята к печати 10.09.1990