

## ВЛИЯНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ, ВВЕДЕННЫХ $\alpha$ -ЧАСТИЦАМИ, НА ОБРАТНЫЕ ТОКИ КРЕМНИЕВЫХ $p$ - $n$ -ПЕРЕХОДОВ

Александров О. В., Шевченко Б. Н., Матханова И. П., Каменец А. В.

С помощью методики нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней на барьерах Шоттки и отжигов в диапазоне температур 100—340 °С исследованы радиационные дефекты, вводимые  $\alpha$ -частицами ( $\alpha$ -РД) изотопного источника на основе  $^{210}\text{Po}$  в  $p$ - и  $n$ -Si. В  $p$ -Si обнаружены центры с уровнями  $E_V + 0.20$ ,  $E_V + 0.24$ ,  $E_V + 0.32$  и  $E_V + 0.42$  эВ, а в  $n$ -Si с уровнями  $E_C - 0.18$ ,  $E_C - 0.23$ ,  $E_C - 0.30$  и  $E_C - 0.37$  эВ. Изучено влияние отжига в диапазоне температур 200—500 °С на обратные токи  $n^+$ - $p$ - и  $p^+$ - $n$ -переходов. Показано, что энергии активации обратных токов  $n^+$ - $p$ - и  $p^+$ - $n$ -переходов коррелируют с энергетическими уровнями доминирующих генерационно-рекомбинационных центров, обусловленных  $\alpha$ -РД, в  $p$ - и  $n$ -Si соответственно.

$\alpha$ -Частицы наряду с другими высокоэнергетическими частицами используются в радиационной технологии для изменения свойств полупроводников и контроля параметров полупроводниковых приборов [1, 2]. Радиационные дефекты, образующиеся при  $\alpha$ -облучении кремния  $n$ - и  $p$ -типа ( $\alpha$ -РД), исследовались в работах [3–10] и [11, 12] соответственно. Было показано, что  $\alpha$ -РД, помимо вакансий ( $V$ ) и междоузлий ( $I$ ), могут включать в себя атомы примесей О и С. Энергетический спектр  $\alpha$ -РД зависит от условий облучения, отжига и примесного состава кристалла. Изучалось влияние  $\alpha$ -РД на электропроводность и время жизни неосновных носителей заряда в кремнии  $n$ - и  $p$ -типа [2, 4, 6, 11].

В настоящей работе исследуется влияние энергетического спектра  $\alpha$ -РД в  $n$ - и  $p$ -Si на обратные токи  $n^+$ - $p$ - и  $p^+$ - $n$ -переходов.

Облучение  $\alpha$ -частицами проводилось с помощью изотопного источника на основе  $^{210}\text{Po}$ . Средняя энергия частиц на поверхности образцов составляла 2.5 МэВ, интегральный поток  $\Phi = 2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  в случае неколлимированного пучка и  $\Phi = 1.3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  в случае коллимированного (угол коллимации 43°).

Энергетический спектр  $\alpha$ -РД определялся с помощью метода НЕСГУ на барьерах Шоттки. Последние изготавливались путем напыления алюминия на полированные пластины кремния, выращенного методом Чохральского,  $p$ -типа (КДБ-10) толщиной 300 мкм, а также на эпитаксиальные слои кремния  $n$ -типа с удельным сопротивлением 1 Ом·см толщиной 4 мкм, выращенные на пластинах кремния  $p$ -типа (КДБ-10). Чувствительность методики НЕСГУ к концентрации глубоких центров составляла  $5 \cdot 10^{-4}$  от концентрации мелкой легирующей примеси, погрешность при определении энергии не превышала 0.02 эВ. После  $\alpha$ -облучения проводились изохронные отжиги барьеров Шоттки в течение 1 ч в диапазоне температур 100—340 °С.

$p^+$ - $n$ -Переходы изготавливались путем диффузии бора с поверхностной концентрацией  $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  на глубину 1.3 мкм в эпитаксиальные слои кремния  $n$ -типа с удельным сопротивлением 2.5 Ом·см толщиной 10 мкм, выращенные на подложках кремния  $n$ -типа (КЭС 0.01) толщиной 300 мкм.  $n^+$ - $p$ -Переходы

изготавливались путем диффузии фосфора с поверхностной концентрацией  $2 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$  на глубину 0.75 мкм в кремний  $p$ -типа. Обратные токи  $n^+ - p^-$  и  $p^+ - n^-$  переходов измерялись в диапазоне температур 20—200 °С. После  $\alpha$ -облучения проводились изохронные отжиги в диапазоне температур 200—500 °С.

После  $\alpha$ -облучения в кремнии  $n$ -типа наблюдаются электронные ловушки с уровнями  $E_c - 0.18$  (E1),  $E_c - 0.23$  (E2) и  $E_c - 0.37$  эВ (E3) с сечениями захвата соответственно  $9 \cdot 10^{-15}$ ,  $3 \cdot 10^{15}$  и  $2 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$ . При 340 °С после отжига уровней E2 и E3 появляется новый уровень с энергией  $E_c - 0.30$  эВ (E4), с сечением захвата  $1 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$ . Влияние отжига на концентрацию  $\alpha$ -РД в  $n$ -Si показано на рис. 1. Уровень E1 наблюдался во всех работах по  $\alpha$ -облучению кремния  $n$ -типа и приписывался комплексу V—O (A-центру) ( $E = 0.165 - 0.18$  эВ [ $1-9$ ],  $T_{\text{отж}} = 300 - 450$  °С [ $1, 3, 6, 9$ ]). Уровни E2 и E3 связывались с различными зарядовыми состояниями дивакансии  $V_2^{\pm}$  ( $E = 0.21 - 0.26$  эВ [ $1, 3, 5, 7, 10$ ],  $T_{\text{отж}} = 280 - 480$  °С [ $1, 3, 9$ ]) и  $V_2$  ( $E = 0.36 - 0.41$  эВ [ $1, 3 - 5, 7, 10$ ],  $T_{\text{отж}} = 300$  °С [ $3$ ]). В работах [ $6, 8$ ] уровень  $E_c - 0.23$  эВ с температурой отжига  $T_{\text{отж}} = 250$  °С связывался с кислородным комплексом или комплексом с дивакансией, а уровень  $E_c - 0.37$  эВ с  $T_{\text{отж}} = 300 - 375$  °С — с комплексом дивакансии с кислородом. Одновременный отжиг центров E2 и E3 при 340 °С (рис. 1) свидетельствует в пользу одинаковой, дивакансионной, природы этих центров. Центр с уровнем  $E_c - 0.31$  эВ, близкий по энергии к E4, наблюдался в работе [ $9$ ] после  $\alpha$ -облучения и отжига при температуре свыше 100 °С и предполагался многовакансионным комплексом. В работе [ $13$ ] было показано, что центр с энергией, как у E4, наблюдавшийся после облучения  $n$ -Si электронами с энергией 1.5 МэВ, связан с кислородом. Поскольку центр E4 образуется после отжига дивакансий E2 и E4 (рис. 1), можно предположить, что он является кислородно-вакансионным комплексом, вероятно,  $V_2 - O$  ( $E = 0.30 - 0.35$  эВ,  $T_{\text{отж}} = 300 - 450$  °С [ $1, 14$ ]) или  $V_3 - O$  ( $E = 0.27$  эВ,  $T_{\text{отж}} = 450$  °С [ $1$ ]).

В кремнии  $p$ -типа после  $\alpha$ -облучения наблюдаются дырочные ловушки с уровнями  $E_v + 0.20$  (H1),  $E_v + 0.32$  (H2) и  $E_v + 0.42$  эВ (H3) с сечениями захвата  $2 \cdot 10^{-15}$ ,  $6 \cdot 10^{-16}$  и  $1 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2$  соответственно. При температуре 200 °С появляется новый уровень H4 с энергией  $E_v + 0.24$  эВ и сечением захвата  $2 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ . Влияние отжига на концентрацию  $\alpha$ -РД в  $p$ -Si показано на рис. 2. Уровни с энергией, соответствующей центру H1, наблюдались при облучении  $p$ -Si как  $\alpha$ -частицами, так и высокоэнергетическими (1 МэВ) электронами ( $E = 0.20 - 0.21$  эВ,  $T_{\text{отж}} = 300$  °С [ $3, 11$ ]) и связывался с дивакансией  $V_2^{\pm}$ . Уровень, соответствующий по энергии центру H2, наблюдался в работе [ $15$ ] при облучении  $p$ -Si электронами (1.5 МэВ) и был идентифицирован как комплекс  $V_2 - C - O$  (K-центр) ( $E = 0.30 - 0.32$  эВ [ $1, 15$ ],  $T_{\text{отж}} = 300 - 350$  °С [ $1$ ]). Дефект с близкой энергией  $E_v + 0.35$  эВ и  $T_{\text{отж}} = 400$  °С наблюдался при  $\alpha$ -облучении  $p$ -Si [ $11, 12$ ] и связывался с углеродно-кислородным комплексом ( $C_i - O_i$  или  $C_i - O_s$ ). Авторами [ $16$ ] было показано, что наблюдавшийся в ряде работ по облучению  $p$ -Si уровень со средней энергией  $E_v + 0.35 \div 0.36$  эВ, связывавшийся как с K-центром, так и с комплексом межузельный углерод—узельный углерод ( $C_i - C_s$ ), состоит из двух уровней:  $E_v + 0.34$  и  $E_v + 0.37$  эВ. Причем, согласно [ $16$ ], первый из них, близкий к уровню H2, относится к комплексу C—O<sub>i</sub>, а второй — к комплексу C<sub>s</sub>—Si—C<sub>s</sub>. Центр H3 с низкой температурой отжига является, по-видимому, комплексом B—V ( $E = 0.45$  эВ,  $T_{\text{отж}} = 30 - 230$  °С [ $1, 17$ ]). Появляющийся при  $T_{\text{отж}} > 200$  °С уровень H4 можно сопоставить с неидентифицированным дефектным уровнем  $E_v + 0.24$  эВ, наблюдавшимся после облучения  $p$ -Si электронами (1 МэВ) и отжига при температурах от 175 до 350 °С [ $18$ ], а также с неидентифицированными уровнями  $E_v + 0.22$  и  $E_v + 0.26$  эВ, наблюдавшимися после  $\alpha$ -облучения и отжига при 230—250 °С с  $T_{\text{отж}} = 370 - 380$  °С [ $11$ ]. Поскольку этот центр H4 появляется после отжига дефекта H3 (B—V) при уменьшении концентрации центра H1 ( $V_2^{\pm}$ ), есть основания полагать, что в состав РД H4 входят вакансии.

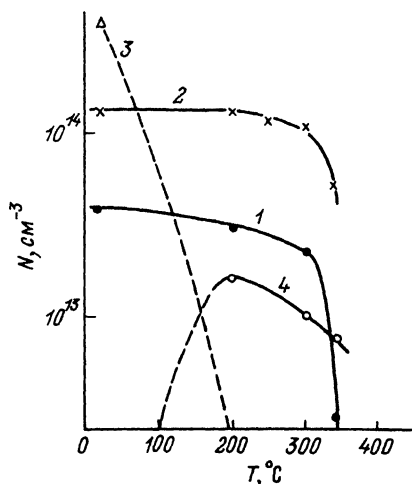
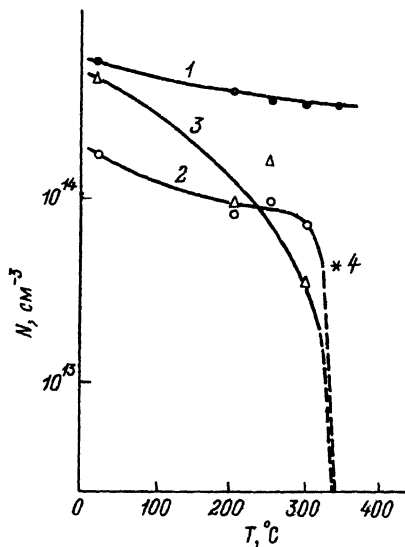


Рис. 1. Отжиг  $\alpha$ -РД в  $n$ -Si ( $\Phi_{\text{некол}} = 2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ).

Рис. 2. Отжиг  $\alpha$ -РД в  $p$ -Si ( $\Phi_{\text{кол}} = 1.3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ).

1 — E1 (0.18 эВ), 2 — E2 (0.23 эВ), 3 — E3 (0.37 эВ), 4 — E4 (0.30 эВ).

1 — H1 (0.20 эВ), 2 — H2 (0.32 эВ), 3 — H3 (0.42 эВ), 4 — H4 (0.24 эВ).

Отметим, что энергетический спектр  $\alpha$ -РД при облучении коллимированным пучком аналогичен спектру  $\alpha$ -РД при облучении неколлимированным пучком как в  $n$ -, так и в  $p$ -Si, а концентрации дефектов в случае неколлимированного пучка примерно в 1.5 раза выше — в соответствии с дозой.

Для изучения влияния энергетических уровней  $\alpha$ -РД на обратные токи  $p^+$ - $n$ - и  $n^+$ - $p$ -переходов снимались температурные зависимости  $I_{\text{обр}}(1/T)$  и опреде-

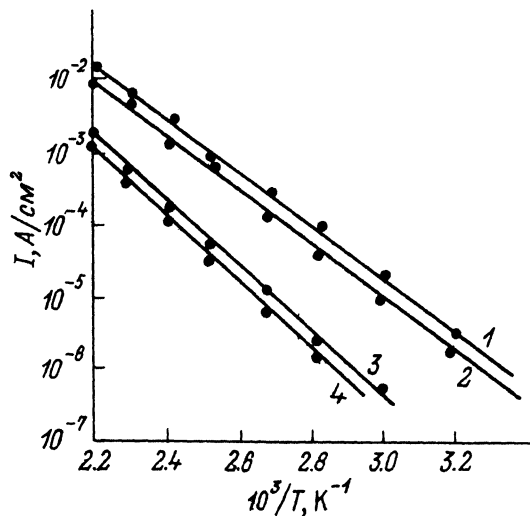


Рис. 3. Температурная зависимость обратного тока  $p^+$ - $n$ -перехода ( $U_{\text{обр}} = 5 \text{ В}$ ) после  $\alpha$ -облучения (1) и отжига (2—4).

$T, ^\circ\text{C}$ : 2 — 300, 3 — 350—400, 4 — 450—500. Энергия активации, эВ; 1 — 0.72, 2 — 0.73, 3 — 0.90, 4 — 0.92.

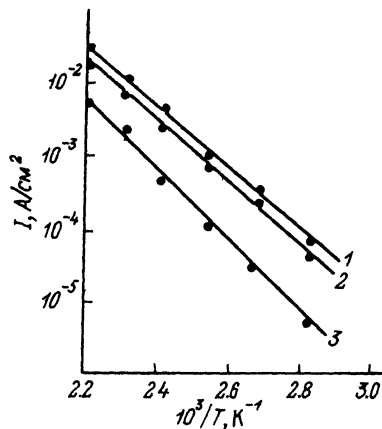


Рис. 4. Температурная зависимость обратного тока  $n^+$ - $p$ -перехода ( $U_{\text{обр}} = 3 \text{ В}$ ) после  $\alpha$ -облучения (1) и отжига (2, 3).

$T, ^\circ\text{C}$ : 2 — 300, 3 — 350—500. Энергия активации, эВ: 1 — 0.79, 2 — 0.82, 3 — 0.90.

лялись энергии активации обратного тока  $E_a$ . Как видно из рис. 3, 4, наиболее сильное уменьшение обратного тока наблюдается при температурах отжига между 300 и 350 °С, когда  $\alpha$ -РД отжигаются наиболее интенсивно (рис. 1, 2). Энергетическое положение генерационно-рекомбинационных центров (ГРЦ), вносящих основной вклад в величину обратного тока, связано с энергией активации последнего соотношением  $E_t = E_g - E_a$ , где  $E_g$  — ширина запрещенной зоны кремния ( $E = 1.12$  при 300 К). В случае  $p^+ - n$ -перехода (рис. 3) непосредственно после облучения и вплоть до  $T_{отж} = 300$  °С основной вклад в обратный ток вносит ГРЦ с энергией  $E_t = 0.39 - 0.40$  эВ, коррелирующий по энергии и температуре отжига с  $\alpha$ -РД  $E3$  ( $V_2$ ). Более мелкий дефект  $E1$  в этом температурном диапазоне менее генерационно активен, чем  $E3$ , несмотря на большую концентрацию. Однако при  $T_{отж} \geq 350$  °С преобладает влияние ГРЦ с энергией  $E_t = 0.20 - 0.22$  эВ, который коррелирует с  $\alpha$ -РД  $E1$  ( $A$ -центр). В случае  $n^+ - p$ -перехода (рис. 4) после  $\alpha$ -облучения и вплоть до  $T_{отж} = 300$  °С доминирующим является ГРЦ с энергией  $E_t = 0.30 - 0.31$  эВ, коррелирующий по температуре отжига и энергии с  $\alpha$ -РД  $H2$  ( $K$ -центр). При  $T_{отж} \geq 350$  °С основной вклад в обратный ток вносит ГРЦ с энергией  $E_t = 0.22$  эВ, коррелирующий с  $\alpha$ -РД  $H4$  (вакансионный комплекс).

Таким образом, при  $\alpha$ -облучении и последующем отжиге вносятся  $\alpha$ -РД со следующими уровнями в  $n$ -Si:  $E_c - 0.18$ ,  $E_c - 0.23$ ,  $E_c - 0.30$ ,  $E_c - 0.37$  эВ и в  $p$ -Si:  $E_v + 0.20$ ,  $E_v + 0.24$ ,  $E_v + 0.30$ ,  $E_v + 0.42$  эВ. Обратные токи  $p^+ - n$ - и  $n^+ - p$ -переходов определяются ГРЦ, связанными с  $\alpha$ -РД  $E3$  и  $E1$  в  $n$ -Si и  $H2$  и  $H4$  в  $p$ -Si соответственно.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Вопросы радиационной технологии полупроводников / Под ред. Л. С. Смирнова. Новосибирск, 1980. 296 с.
- [2] Губская В. И., Звягин В. И., Кучинский П. В., Ломако В. М. // Электрон. техн. Сер. 2. 1978. № 8. С. 102—106.
- [3] Kimerling L. S. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1976. V. 23. N 6. P. 1497—1505.
- [4] Губская В. И., Звягин В. И., Кучинский П. В., Ломако В. М. // ФТП. 1979. Т. 13. В. 1. С. 171—173.
- [5] Губская В. И., Кучинский П. В., Ломако В. М., Петрунин А. П. // ФТП. 1981. Т. 15. В. 2. С. 421—422.
- [6] Берман Л. С., Ременюк А. Д., Шуман В. Б. // ФТП. 1981. Т. 15. В. 6. С. 1155—1158.
- [7] Губская В. И., Кучинский П. В., Ломако В. М., Петрунин А. П. // ФТП. 1985. Т. 19. В. 3. С. 532—534.
- [8] Берман Л. С., Маляренко А. М., Ременюк А. Д., Суханов В. Л., Толстобров М. Г. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 5. С. 844—848.
- [9] Indusekhar H., Kumar V., Sengupta D. // Phys. St. Sol. (a). 1986. V. 93. N 2. P. 645—653.
- [10] Кузнецов Н. В., Филатов В. Н., Виноградова В. Г. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 4. С. 609—614.
- [11] Губская В. И., Кучинский П. В., Ломако В. М. // ФТП. 1986. Т. 20. В. 6. С. 1055—1059.
- [12] Кучинский П. В., Ломако В. М., Петрунин А. П. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 9. С. 1625—1628.
- [13] Ewvarage A. O. // Appl. Phys. Lett. 1976. V. 29. N 8. P. 476—478.
- [14] Козлов В. И., Литвиненко А. Г. // ФТП. 1972. Т. 6. В. 10. С. 2048—2050.
- [15] Lee Y. H., Corbett J. W., Brower K. L. // Phys. St. Sol. (a). 1977. V. 41. N 2. P. 637—647.
- [16] Ferenczi G., Londres C. A., Paveika T., Somogyi M., Mertens A. // J. Appl. Phys. 1988. V. 63. N 1. P. 183—189.
- [17] Vavilov V. S., Mukashev B. N., Spitsyn A. V. // Inst. Phys. Conf. Ser. 1973. N 16. P. 284—288.
- [18] Walker J. W., Sah S. T. // Phys. Rev. B. 1973. V. 7. N 10. P. 4587—4604.