

## СЕЛЕКТИВНЫЙ ЗАХВАТ МЕЖУЗЕЛЬНЫХ АТОМОВ УГЛЕРОДА В ОБЛУЧЕННОМ КРЕМНИИ

Маркевич В. П., Мурин Л. И.

Исследован отжиг междузельных атомов углерода ( $C_I$ ) в кристаллах кремния с различным содержанием кислорода ( $O_I$ ) и углерода ( $C_S$ ) после облучения  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  или быстрыми электронами ( $E \approx 4$  МэВ) при  $T_{\text{обл}} \leq 280$  К. Показано, что для небольших доз облучения  $C_S$  и  $O_I$  являются основными стоками для  $C_I$ . Оценено отношение радиусов захвата  $C_I$  атомами углерода и кислорода ( $r_{C_I-O_I}/r_{C_I-C_S} \approx 3$ ). Получено прямое экспериментальное подтверждение принадлежности комплексу  $C_I-C_S$  акцепторного уровня  $E_c - 0.16$  эВ.

Изменение электрических и оптических свойств кристаллов Si, подвергнутых термообработке или облучению, в значительной мере определяется содержанием примесных атомов кислорода и углерода [1, 2]. Ранее было показано [3-5], что в кристаллах облученного кремния одними из основных электрически активных радиационных дефектов (РД) являются углеродосодержащие центры: междузельные атомы углерода ( $C_I$ ) при  $T_{\text{обл}} \leq 300$  К и комплексы междузельного углерода с углеродом замещения ( $C_I-C_S$ ) и кислородом ( $C_I-O_I$ ) при  $T_{\text{обл}} \geq 300$  К. В настоящей работе проведено более детальное изучение процесса отжига  $C_I$  в кристаллах кремния с различным содержанием углерода и кислорода, облученных небольшими дозами  $\gamma$ -квантов  $^{60}\text{Co}$  или быстрых электронов ( $E \approx 4$  МэВ) при  $T_{\text{обл}} \leq 280$  К. Концентрация кислорода и углерода определялась оптическим методом [6], концентрация РД — из температурных ( $T_{\text{изм}} = 77 \div 400$  К) зависимостей концентрации носителей тока (акцепторные уровни  $C_I$  и  $C_I-C_S$  расположены у  $E_c - 0.12$  и  $E_c - 0.16$  эВ соответственно [3, 4]). Использовались кристаллы *n*-кремния с  $n_0 = 10^{12} \div 10^{14}$  см $^{-3}$ , полученные методом Чохральского (тянутые) или бестигельной зонной плавки (зонные).

На рис. 1 представлены зависимости неотожженной доли дефектов с уровнем  $E_c - 0.12$  эВ ( $D_{0.12}$ ), т. е. междузельных атомов углерода, от времени отжига при различных температурах в тянутом (а) и зонном (б) кремнии. Линейный характер изменения доли  $f = N_{C_I}/N_{C_I_0}$  в полулогарифмическом масштабе свидетельствует о том, что концентрация дефектов уменьшается со временем отжига по закону

$$N_{C_I} = N_{C_I_0} \exp(-t/\tau), \quad (1)$$

где  $N_{C_I_0}$  — концентрация  $D_{0.12}$  до отжига,  $\tau$  — постоянная времени отжига.

На рис. 2 показаны зависимости  $\tau$  от температуры отжига для этих же материалов. Данные зависимости имеют вид

$$\tau = \nu^{-1} \exp(\Delta E/kT), \quad (2)$$

где  $\nu$  — так называемый частотный фактор,  $\Delta E$  — энергия активации отжига. Видно, что энергии активации отжига (наклон кривых) практически совпадают для обоих материалов, а «частотные» факторы существенно различаются. Расчет

показывает, что  $\Delta E = 0.77 \pm 0.05$  эВ, а  $\nu = 2.3 \cdot 10^7$  и  $9.1 \cdot 10^9$  с<sup>-1</sup> для зонного и тянутого кристаллов соответственно. Совокупность полученных данных указывает на возможность описания отжига  $C_I$  квазихимическими реакциями типа

$$dN_{C_I}/dt = -N_{C_I} \sum_m k_{C_I-m} N_m, \quad (3)$$

где  $N_m$  — концентрация примесей (дефектов) определенного типа, являющихся стоками для  $C_I$ , причем  $N_m = \text{const}$  в процессе отжига,  $k_{C_I-m}$  — константа скорости (вероятность) реакции взаимодействия  $C_I$  со стоком  $m$ -типа.

Основными стоками для  $C_I$ , как известно, могут быть примесные атомы кислорода, углерода,  $A$ - и  $E$ -центры, дивакансии и т. п. [7]. В наших экспериментах заметного изменения концентрации  $A$ -,  $E$ -центров и дивакансий при отжиге  $C_I$  не наблюдалось (концентрация этих РД не превышала  $10^{14}$  см<sup>-3</sup>).

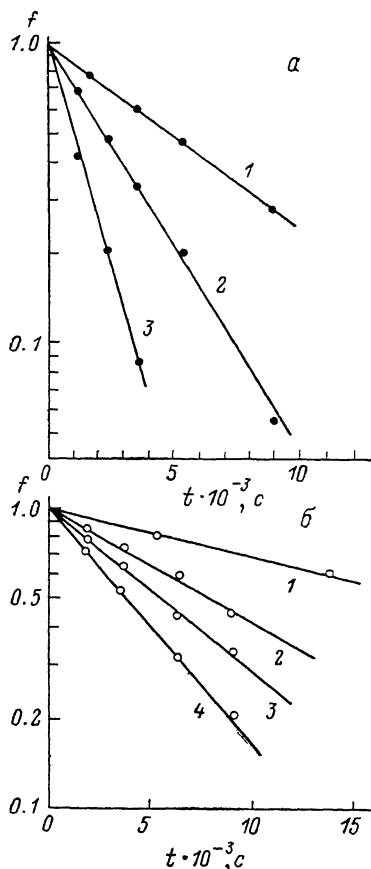


Рис. 1. Зависимости доли неотожженных дефектов с уровнем  $E_c = 0.12$  эВ в тянутом (а) и зонном (б) кремнии от времени отжига при различных температурах.

$N_{\text{обл}} = 3.8 \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup>;  $T_{\text{обл}} \approx 200$  К. а — КЭФ-60;  $N_O \approx 6.6 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>,  $N_C \approx 6.0 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>;  $T_{\text{отж}}$ , К: 1 — 282, 2 — 289, 3 — 296. б — БКЭФ-60;  $N_O < 10^{11}$  см<sup>-3</sup>,  $N_C \approx 5.0 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>;  $T_{\text{отж}}$ , К: 1 — 331, 2 — 341, 3 — 346, 4 — 351.

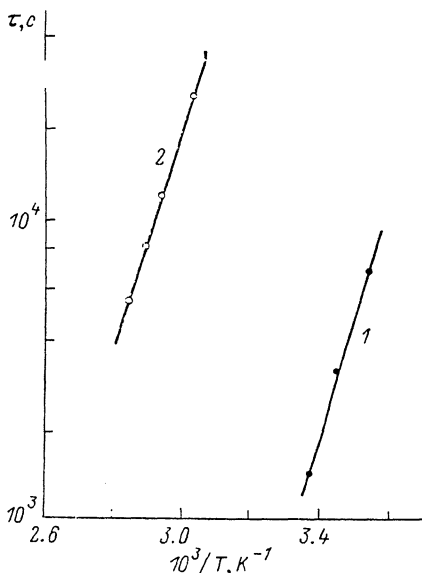


Рис. 2. Зависимости постоянной времени отжига  $C_I$  от температуры для тянутого (1) и зонного (2) кремния.

Поэтому можно было предполагать, что основными стоками для  $C_I$  в исследуемых кристаллах являются  $C_S$  и  $O_I$ , т. е.

$$dN_{C_I}/dt = -k_{C_I-O_I} N_{C_I} N_{O_I} - k_{C_I-C_S} N_{C_I} N_{C_S}, \quad (4)$$

откуда

$$N_{C_I} = N_{C_{I_0}} \exp [-(k_{C_I-O_I} N_{O_I} + k_{C_I-C_S} N_{C_S}) t]. \quad (5)$$

Таким образом, постоянная времени  $\tau$  в выражении (1) есть не что иное, как

$$\tau^{-1} = k_{C_I-O_I} N_{O_I} + k_{C_I-C_S} N_{C_S}. \quad (6)$$

Далее, поскольку отжиг  $C_I$  лимитируется диффузией  $C_I$ , то, согласно теории реакций,  $\frac{v}{N_C}$  лимитируемых диффузией [2], константу скорости можно записать в виде

$$k_{C_I-O_I} = 4\pi r_{C_I-O_I} D, \quad k_{C_I-C_S} = 4\pi r_{C_I-C_S} D,$$

где  $r_{C_I-O_I}$  и  $r_{C_I-C_S}$  — радиусы захвата  $C_I$  атомами кислорода и углерода соответственно,  $D = D_0 \exp(-\Delta E/kT)$  — коэффициент диффузии межузельных атомов углерода. Следовательно,

$$\tau^{-1} = 4\pi D_0 (r_{C_I-O_I} N_{O_I} + r_{C_I-C_S} N_{C_S}) \exp(-\Delta E/kT). \quad (7)$$

Сравнение (7) с (2) позволяет получить выражение для «частотного» фактора отжига  $C_I$ . В кристаллах с  $N_O \gg N_C$  «частотный» фактор

$$v = 4\pi r_{C_I-O_I} N_{O_I}. \quad (8)$$

Если  $N_C \gg N_O$ , то

$$v = 4\pi r_{C_I-C_S} N_{C_S}. \quad (9)$$

Для проверки выполнения данных соотношений исследовались кристаллы трех типов: I — с  $N_O \gg N_C$ , II — с  $N_C \gg N_O$ , III — с  $N_O \approx N_C$ . На рис. 3 показаны экспериментальные зависимости «частотных» факторов отжига  $C_I$  от концентрации кислорода в кристаллах I типа (кривая 1) и углерода в кристаллах II типа (кривая 2). Видно, что  $v$  линейно растет с увеличением концен-

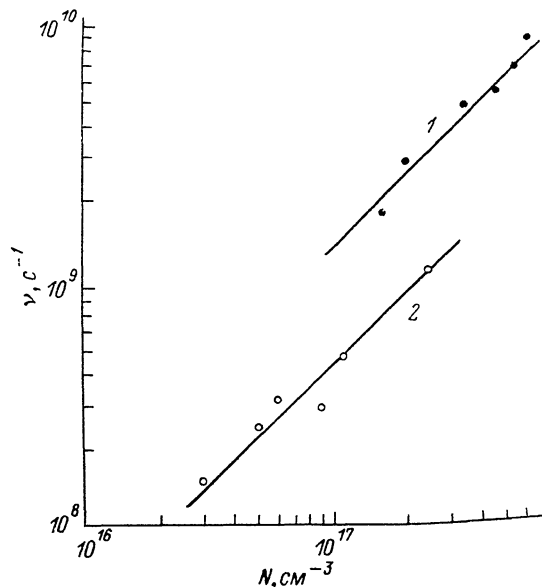


Рис. 3. Зависимости «частотных» факторов отжига межузельных атомов углерода от содержания кислорода (1) и углерода (2) в кристаллах  $n$ -Si с  $N_O \gg N_C$  (1) и  $N_C \gg N_O$  (2).

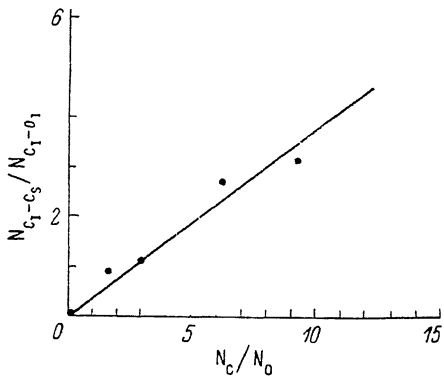


Рис. 4. Зависимость отношения концентраций комплексов  $C_I-C_S$  и  $C_I-O_I$  после полного отжига  $C_I$  от отношения концентраций углерода и кислорода в кристаллах.

Концентрация комплекса  $C_I-O_I$  определялась как  $N_{C_I-O_I} = N_{C_I} - N_{C_I-C_S}$ .

трации данных примесей. Этот факт прямо свидетельствует о том, что атомы кислорода и углерода являются основными стоками для межузельных атомов углерода.

Ранее было показано [3-5], что в кремнии с низким содержанием кислорода при отжиге  $C_I$  в такой же концентрации образуется дефект с уровнем  $E_c - 0.16$  эВ ( $D_{0.16}$ ). Был сделан вывод о принадлежности этого уровня комплексу  $C_I-C_S$ . В кристаллах с  $N_C \gg N_O$ , исследованных в настоящей работе, наблюдалась практически полная перестройка  $D_{0.12}$  в  $D_{0.16}$ . При этом скорость образования  $D_{0.16}$  (или отжига  $D_{0.12}$ ) для данной концентрации  $C_I$  была прямо пропорцио-

нальна концентрации  $C_S$ . Это служит прямым экспериментальным подтверждением идентификации уровня  $E_c - 0.16$  эВ как акцепторного уровня комплекса  $C_I - C_S$ .

Из приведенных на рис. 3 данных можно оценить отношение вероятностей захвата  $C_I$  углеродом и кислородом. Для  $O_I$  эта вероятность примерно в 3 раза выше, чем для  $C_S$ . Такую же величину дает и зависимость отношения концентраций комплексов  $C_I - C_S$  и  $C_I - O_I$ , измеренного после полного отжига  $C_I$ , от отношения концентраций кислорода и углерода в кристаллах III типа (рис. 4). Полученное значение  $r_{C_I - O_I} / r_{C_I - C_S}$  существенно отличается от приведенного в [7], где эта величина равна 0.3. Такое различие может быть обусловлено неоднозначностью обработки экспериментальных данных в [7], поскольку в этой работе исследовалась кинетика накопления РД при больших дозах облучения, когда концентрация РД была сравнима с концентрацией кислорода и углерода. Для таких доз облучения комплексы  $C_I - C_S$ ,  $C_I - O_I$ , А-центры и другие РД могут быть эффективными стоками (центрами непрямои аннигиляции) как для первичных дефектов (вакансий и собственных межузельных атомов кремния), так и для  $C_I$ , что приводит к нелинейному накоплению дефектов и существенно затрудняет интерпретацию экспериментальных зависимостей. В нашем же случае концентрация введенных РД была намного меньше концентрации  $O_I$  и  $C_S$ , эти примеси являлись основными стоками для межузельных атомов углерода, накопление комплексов  $C_I - C_S$  и  $C_I - O_I$  с дозой облучения происходило по линейному закону. Это позволило с достаточно высокой степенью точности определить отношение вероятностей захвата  $C_I$  кислородом и углеродом.

#### Л и т е р а т у р а

- [1] Рейви К. Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии. М., 1984. 475 с.
- [2] Винецкий В. Л., Холодарь Г. А. Радиационная физика полупроводников. Киев, 1979. 336 с.
- [3] Литвинко А. Г., Макаренко Л. Ф., Мурин Л. И., Ткачев В. Д. — ДАН БССР, 1979, т. 23, в. 6, с. 522—524.
- [4] Литвинко А. Г., Макаренко Л. Ф., Мурин Л. И., Ткачев В. Д. — ФТП, 1980, т. 14, в. 4, с. 776—780.
- [5] Murin L. I. — Phys. St. Sol. (a), 1986, v. 93, N 1, p. K147—K149; 1987, v. 101, N 2, p. K107—K110.
- [6] Ильин М. А., Коварский В. Я., Орлов А. Ф. — Зав. лаб., 1984, № 1, с. 24—32.
- [7] Davis G., Oates A. S., Newman R. C. et al. — J. Phys. C: Sol. St. Phys., 1986, v. 19, p. 841—855.

Институт физики твердого тела  
и полупроводников АН БССР  
Минск

Получена 20.08.1987  
Принята к печати 15.12.1987