

## О ПРИРОДЕ К-ЦЕНТРА В КРЕМНИИ

Берман Л. С., Витовский Н. А., Ломасов В. Н., Ткаченко В. Н.

Методами емкостной спектроскопии исследована зависимость скорости введения  $A$ - и  $K$ -центров в  $p$ -базе кремниевых диодов, облученных электронами с энергией 900 кэВ, от электрического поля в области объемного заряда. Показано, что электрическое поле увеличивает скорость введения  $A$ - и  $K$ -центров. Исследована зависимость скорости введения  $K$ -центров от энергии электронов в интервале 300—900 кэВ. Эта зависимость совпадает с измеренными ранее энергетическими зависимостями скоростей введения  $A$ -центров и комплексов междуузельный—узельный углерод. На основании анализа экспериментальных данных показано, что  $K$ -центр содержит помимо кислорода и углерода одну вакансию.

При облучении кремния электронами с энергией  $\varepsilon > 250$  кэВ в нем образуется  $K$ -центр — кислородно-углеродный комплекс. Однако, несмотря на многочисленные исследования (см., например, [1-7]), о его природе существуют различные представления. Так, согласно [8-10], в  $K$ -центр входят только кислород и углерод (CO), согласно [5, 11, 12], — кислород, углерод и вакансия (COV), а согласно [13, 14], — кислород, углерод и дивакансия (COV<sub>2</sub>). Целью настоящей работы является уточнение представлений о природе  $K$ -центра.

*Образцы.* Известно, что в кремнии, облученном электронами, образуется наряду с  $K$ -центром комплекс  $C_i-C_s$  (междуузельный—узельный углерод), нижний (донорный) уровень которого близок к уровню  $K$ -центра, причем в кремнии с высокой концентрацией кислорода скорость введения  $K$ -центров  $v_K$  много больше скорости введения  $C_i-C_s$   $v_{C_i-C_s}$  [10, 15-17]. Поэтому для наших исследований были изготовлены  $n^+$ - $p$ -диоды из  $p$ -Si(Cz). Область  $n^+$  создавалась диффузией фосфора. Глубина залегания  $n^+$ - $p$ -перехода  $x_j=1$  мкм. Все образцы облучались электронами со стороны области  $n^+$ . Источник электронов тот же, что и в работе [18]. Интенсивность облучения при всех энергиях  $J=6 \cdot 10^{13}$  см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>. Были изготовлены две группы образцов: I — для исследования влияния электрического поля на скорость введения радиационных дефектов (РД), II — для исследования энергетической зависимости скорости введения  $K$ -центров.

*Группа I.* Образцы с удельным сопротивлением базы  $\rho_b=1.8$  Ом·см. Контакты к базе и к области  $n^+$  полосковые. Облучение электронами с энергией  $\varepsilon=900$  кэВ, дозой  $\Phi=5 \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup>: два образца (группа Ia) — при обратном напряжении 5 В, что соответствует толщине области объемного заряда (ООЗ) 1 мкм и максимальному электрическому полю  $E_m=1.2 \cdot 10^5$  В/см, а два образца (группа Ib) — без обратного напряжения.

*Группа II.* Образцы с  $\rho_b=40$  Ом·см. Облучение электронами (без обратного напряжения) в интервале энергий  $\varepsilon=300-900$  кэВ при  $T_{0,1}=300$  и 500 К. При каждом значении энергии и температуры облучались по два образца, расположенных на одной пластине.

### Методика измерений

Для идентификации РД и измерения их концентрации использовался емкостный метод [19]. Измерительная установка описана в работе [20]. Релаксация емкости  $C(t)$  в ходе перезарядки  $K$ -центров измерялась после переключе-

ния от 0.5 до 5 В (для образцов группы I) и от 0.5 до 10 В (для образцов группы II). Для измерения концентрации А-центров (комплекс вакансия—кислород с уровнем  $E_c - 0.17$  эВ) в образцах группы I использовалось оптическое возбуждение со стороны базы [19, с. 23]. Зависимость  $\tau_K(\epsilon)$  в образцах группы II измерялась методом двойной изотермической релаксации емкости (см. [21]).

### Результаты измерений и их обсуждение

**Группа I.** В *p*-базе в слое 1 мкм, примыкающем к области  $n^+$  (т. е. в слое, равном для группы Ia толщине ООЗ при облучении), средняя концентрация А-центров  $N_A$  составляет: для группы Ia  $N_{A(Ia)} = 0.4 \cdot 10^{14}$ , для группы Ib  $N_{A(Ib)} = 0.2 \cdot 10^{14}$  см<sup>-3</sup>, т. е. при облучении с внешним электрическим полем концентрация А-центров в 2 раза больше, чем без поля. Следовательно, необхо-

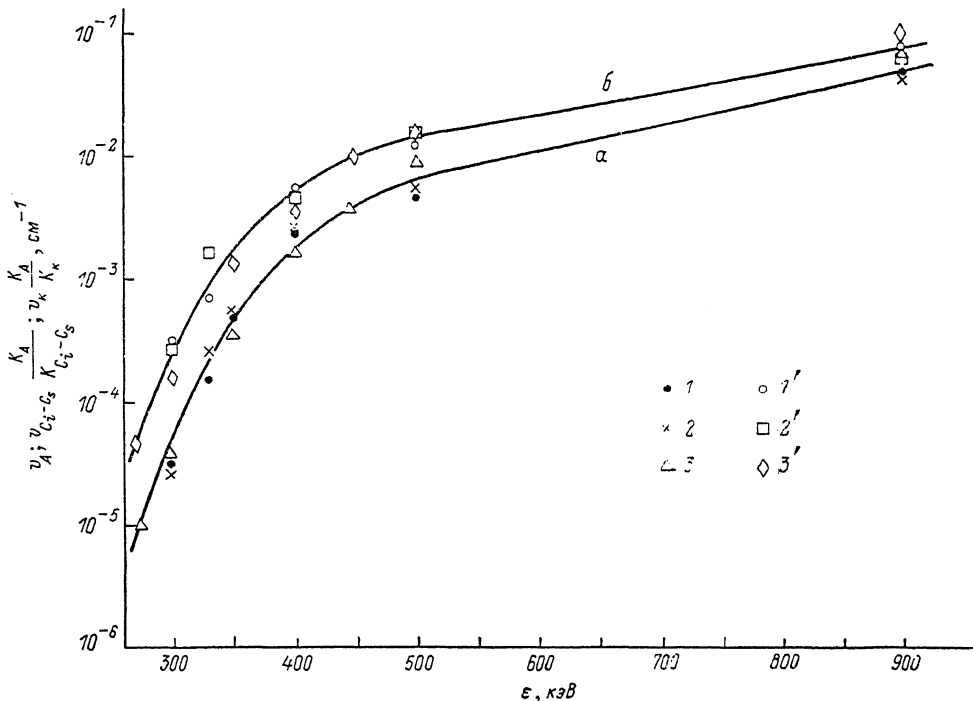


Рис. 1. Энергетические зависимости скорости введения А-центров (1, 1'), комплексов  $C_i - C_s$  (2, 2') и К-центров (3, 3') при 300 К (1—3) (а) и 500 К (1'—3') (б).

димо считать, что при облучении с внешним электрическим полем концентрация вакансий в ООЗ больше, чем в области электрической нейтральности (ОЭН). В том же слое средняя концентрация К-центров  $N_K$  для группы Ia  $N_{K(Ia)} = 2 \cdot 10^{14}$ , а для группы Ib  $N_{K(Ib)} = 0.5 \cdot 10^{14}$  см<sup>-3</sup>, т. е. при облучении с внешним электрическим полем концентрация К-центров в 4 раза больше, чем при облучении без поля (аналогичное соотношение получено в работе [22]). Из этого соотношения следует сделать вывод, что в состав К-центра входит по меньшей мере одна вакансия.

**Группа II.** На рис. 1 приведены зависимости  $v_K(\epsilon)$  при  $T_{обл} = 300$  и 500 К. Там же для сравнения приведены энергетические зависимости скоростей введения А-центров  $v_A(\epsilon)$  и комплексов  $C_i - C_s$ ,  $v_{C_i - C_s}$  в *n*-базе  $p^+ - n$ -диодов (по данным работы [21]). На рис. 1 значения  $v_{C_i - C_s}$  и  $v_K$  умножены на  $K_{i1}/K_{C_i - C_s} = 0.07/0.045$  и на  $K_A/K_K = 0.07/0.025$  соответственно, где коэффициенты  $K$  характеризуют вероятность взаимодействия подвижного компонента ( $V, I, C_s$ ) с зародышем будущего РД [21].

Главная трудность, возникающая при попытке строго количественного анализа температурных зависимостей скоростей введения различных РД, обусловлена невозможностью измерения скоростей введения пар Френкеля (ПФ)

в кремнии при не слишком низких температурах и состоит в следующем. Невозможно априори определить, обусловлен ли рост скоростей введения РД с повышением температуры уменьшением пороговой энергии  $E_2^{2\Phi}$  или увеличением коэффициента  $K$ . Поскольку коэффициенты  $K$  практически не зависят от энергии [21], соотношение скоростей образования одних и тех же РД при разных температурах должно было бы оставаться постоянным, если бы главной была зависимость  $K(T)$ . В действительности, однако, различие этих скоростей возрастает при уменьшении энергии  $\epsilon$ . Это заставляет нас вести расчет в предположении, что главной является зависимость  $\nu_{\text{ПФ}}(T)$ , а возможной зависимостью  $K(T)$  пренебречь. Поэтому при построении рис. 1 проводилось усреднение  $K$  по экспериментальным данным, относящимся к обеим температурам (300 и 500 К) для каждого РД. Коэффициенты  $K$  содержат неизвестные времена

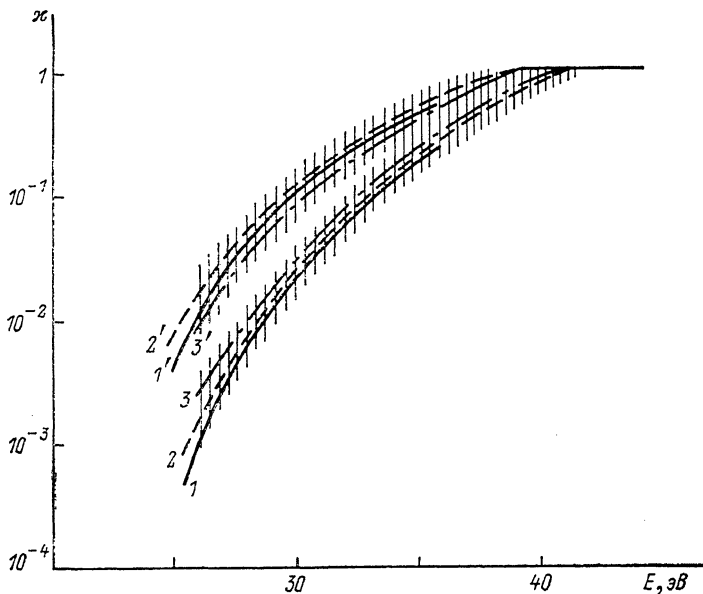


Рис. 2. Зависимость вероятности смещения атома кремния от получаемой им энергии, вычисленная из экспериментальных данных.

1—3, 1'—3' — то же, что и на рис. 1.

жизни  $\tau_V^*$ ,  $\tau_I^*$  вакансий и межузельных атомов относительно их захвата на зародыши будущих РД. Поэтому, вообще говоря, естественно ожидать, что для разных РД и абсолютные величины этих коэффициентов, и их температурные зависимости могут сильно различаться. Однако для исследованных нами образцов эти коэффициенты одного порядка. Действительно,  $K_A = (0.07 \pm 0.02)$  и  $K_{C_i - C_s} = (0.045 \pm 0.01) \text{ см}^{-1}$  [21]; в настоящей работе имеем  $K_K = (0.025 \pm 0.01) \text{ см}^{-1}$ .

Согласно [14],  $K$ -центр является комплексом  $\text{COV}_2$ . Однако для образования дивакансии при смещении двух соседних атомов кремния из их узлов требуется приблизительно вдвое большая энергия, чем для смещения одного атома. Следовательно, в этом случае порог дефектообразования (ПД)  $K$ -центра должен быть вдвое выше, чем ПД вакансионно-примесных комплексов (например,  $A$ -центров), что противоречит результатам наших экспериментов. Дивакансия может образоваться также из двух вакансий, возникших независимо. В этом случае вероятность образования дивакансии пропорциональна квадрату стационарной концентрации вакансий, т. е.  $(\eta x)^2$ , где  $\eta(\epsilon, E)$  — вероятность передачи атому энергии  $E$  электроном с энергией  $\epsilon$ ;  $x(E)$  — вероятность того, что регулярный атом, получивший энергию  $E$ , сместится из узла кристаллической решетки. Вероятность поочередного присоединения двух вакансий к кислороду, углероду или комплексу  $\text{CO}$  также пропорциональна  $(\eta x)^2$ . При  $\epsilon < 500$  кэВ функция  $x(E)$  резко убывает с уменьшением энергии [21]. Поэтому при  $\epsilon < 500$  кэВ скорость введения комплекса, содержащего дивакансию, должна убывать с уменьшением энергии более резко, чем скорость введения

комплекса, содержащего одну вакансию. Следовательно, совпадение энергетических зависимостей  $v_K(\varepsilon)$ ,  $v_A(\varepsilon)$  и  $v_{C_i-C_s}(\varepsilon)$  свидетельствует о том, что в  $K$ -центр входит одна вакансия.

Из экспериментальных зависимостей  $v_K(\varepsilon)$  следует также, что энергетический порог образования  $K$ -центра определяется пороговой энергией образования ПФ, так как после ее образования образуется и межузельный углерод путем реакции Уоткинса



Совпадение зависимостей  $v_K(\varepsilon)$ ,  $v_A(\varepsilon)$  и  $v_{C_i-C_s}(\varepsilon)$  приводит к совпадению значений функции  $\kappa(E)$ , определенной по каждой из этих энергетических зависимостей (рис. 2), и указывает на применимость теории [23] к образованию  $K$ -центров.

Рассмотрим возможные пути образования  $K$ -центра. В работе [21] показано, что в процессе выращивания кремния в нем образуется комплекс узельного углерода  $C_s$  с межузельным кислородом  $O_i$ . Этот комплекс мало подвижен и стабилен из-за высокой энергии связи.  $K$ -центр может образоваться путем захвата вакансии этим комплексом



Анализ температурных зависимостей скоростей введения различных РД привел авторов работы [14] к выводу о малой вероятности реакции (2), поскольку эффективное образование  $K$ -центров начинается не при той температуре, когда в  $p$ -Si становятся подвижными вакансии ( $T \sim 170$  К), а при той температуре, когда становится подвижным межузельный углерод ( $T \sim 300$  К). На основании результатов работы [14] можно считать, что заключительным актом образования  $K$ -центра является присоединение  $C_i$  к некоторому  $X$ -центру, состав которого рассмотрим далее. В пользу этого утверждения свидетельствуют данные работы [25], где показано, что в ходе отжига  $C_i-C_s$  возрастает концентрация  $K$ -центров, однако это возрастание не сопровождается уменьшением концентрации  $A$ -центров, т. е.  $K$ -центр образуется не путем присоединения  $C_i$  к  $A$ -центру.

Совокупность экспериментальных данных можно объяснить в предположении, что  $K$ -центр образуется путем следующих реакций:



Комплекс  $\text{VO}_2$  не наблюдается в ходе электрических измерений (в том числе емкостных). Поэтому мы предполагаем, что он либо не активен электрически, либо создает мелкие уровни в запрещенной зоне кремния. Реакции (3) объясняют, в частности, возрастание концентрации  $K$ -центров в ходе отжига  $A$ -центров [26]. Действительно, при температуре отжига  $A$ -центров ( $T \approx 350$  °С) межузельный кислород подвижен [27, с. 43], поэтому возможен захват межузельного кислорода нераспавшимися  $A$ -центрами с образованием комплекса  $\text{VO}_2$  и последующим присоединением межузельного углерода.

На основании наших экспериментов и литературных данных можно сделать следующий вывод.  $K$ -центр содержит наряду с кислородом и углеродом одну вакансию и является, по-видимому, комплексом межузельный углерод—вакансия—два атома кислорода.

Авторы выражают признательность И. И. Ясковцу за обсуждение вопроса и ряд полезных советов.

#### Список литературы

- [1] Vavilov V. S., Plotnikov A. F. // J. Phys. Soc. Japan. 1963. V. 18. (Suppl. 3). P. 230—234.
- [2] Sonder E., Templeton L. C. // J. Appl. Phys. 1965. V. 36. N 6. P. 1811—1815.
- [3] Almeleh N., Goldstein B. // Phys. Rev. 1966. V. 149. N 2. P. 687—692.
- [4] Козлов И. П., Логвиненко Т. А., Лугаков П. Ф., Ткачев В. Д. // ФТП. 1974. Т. 8. В. 8. С. 1431—1435.

- [5] Brelot A., Charlemagne J. // *Irrad. Eff. Semicond.* / Ed. by J. W. Corbett, G. D. Watkins. N. Y., 1971. P. 161—167.
- [6] Walker J. W., Sah C. T. // *Phys. Rev. B.* 1973. V. 7. N 10. P. 4587—4605.
- [7] Власенко Л. С., Лебедев А. А., Рожков В. М. // *ФТП.* 1980. Т. 14. В. 11. С. 2152—2156.
- [8] Trombetta J. M., Watkins G. D. // *Appl. Phys. Lett.* 1987. V. 51. N 14. P. 1103—1105.
- [9] Davies G. D., Oates A. S., Newman R. C., Wooley R., Lightowlers E. C., Birns M. J., Wilkes J. C. // *J. Phys. C.* 1986. V. 19. N 6. P. 841—855.
- [10] Londos C. A. // *Japan. J. Appl. Phys.* 1988. V. 27. N 11. P. 2089—2093.
- [11] Mooney P. M., Cheng L. J., Süly M., Gerson J. D., Corbett J. W. // *Phys. Rev. B.* 1977. V. 15. N 8. P. 3836—3843.
- [12] Lee Y. H., Cheng L. J., Gerson J. D., Mooney P. M., Corbett J. W. // *Sol. St. Commun.* 1977. V. 21. N 1. P. 109—111.
- [13] Calma A. H., Corelli J. C. // *Phys. Rev.* 1968. V. 173. N 3. P. 734—745.
- [14] Lee Y. H., Corbett J. W., Brower K. L. // *Phys. St. Sol. A.* 1977. V. 41. N 2. P. 637—647.
- [15] Jellison G. E. // *J. Appl. Phys.* 1982. V. 53. N 8. P. 5715—5719.
- [16] Ferenci G., Londos C. A., Pavelka T., Somogi M. // *J. Appl. Phys.* 1988. V. 63. N 1. P. 183—189.
- [17] Brotherton S. D., Bradley P. // *J. Appl. Phys.* 1982. V. 53. N 8. P. 5720—5732.
- [18] Берман Л. С., Витовский Н. А., Воронков В. Б., Ломасов В. Н., Ткаченко В. Н. // *ФТП.* 1990. Т. 24. В. 7. С. 1213—1215.
- [19] Берман Л. С., Лебедев А. А. Емкостная спектроскопия глубоких центров в полупроводниках. Л., 1981. 176 с.
- [20] Берман Л. С., Ременько А. Д., Толстобров М. Г. // *Препринт ФТИ АН СССР.* Л., 1985. № 974.
- [21] Берман Л. С., Витовский Н. А., Ломасов В. Н., Ткаченко В. Н. // *ФТП.* 1990. Т. 24. В. 10. С. 1816—1822.
- [22] Болотов В. В., Карпов А. В., Стучинский В. А. // *ФТП.* 1988. Т. 22. В. 1. С. 49—55.
- [23] Впнецкий В. Л., Ясковец И. И. // *ФТТ.* 1972. Т. 14. В. 10. С. 3046—3052.
- [24] Newman R. M., Wakefield J. // *J. Phys. Chem. Sol.* 1961. V. 19. N 2. P. 230—235.
- [25] Берман Л. С., Желко В. И., Ломасов В. Н., Ткаченко В. Н. // *ФТП.* 1989. Т. 23. В. 12. С. 2129—2132.
- [26] Берман Л. С., Витман Р. Ф., Шуман В. Б. // *ФТП.* 1975. Т. 9. В. 2. С. 311—315.
- [27] Милнс А. Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках. М., 1977. 562 с.

Физико-технический институт  
им. А. Ф. Иоффе АН СССР  
Ленинград

Получена 17.08.1990  
Принята к печати 17.08.1990