

О ПРИРОДЕ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В *n*-КРЕМНИИ, ОБЛУЧЕННОМ ЭЛЕКТРОНАМИ С ЭНЕРГИЕЙ ВБЛИЗИ ПОРОГА ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ

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

Исследованы радиационные дефекты (РД), образующиеся в *n*-базе кремниевых диодов, облученных электронами с энергией 270 и 300 кэВ. Методом DLTS обнаружены следующие комплексы: вакансия—кислород (А-центр), кислород—углерод—вакансия (К-центр) и межузельный—узельный углерод. Эти РД и РД, образующиеся при облучении кремния электронами с энергией порядка 1 мэВ, идентичны.

Природа радиационных дефектов (РД) в кремнии, облученном электронами, рассматривается в ряде работ [1-3]. Однако РД, образующиеся вблизи порога дефектообразования (ПД), изучены мало. Этот вопрос рассматривается в настоящей работе. Использовались методы DLTS [4] и двойной изотермической релаксации [5] в сочетании с измерением времени жизни [6].

Образцы

Группа 1. $p^+ - n - n^+$ -Диоды изготовлены диффузией бора в инертной среде в одной технологической партии. Исходный *n*-кремний fz, $\rho = 500$ Ом·см. Концентрация остаточных глубоких центров (ГЦ) $N_r < 2 \cdot 10^9$ см⁻³. Образцы облучены электронами с энергиями $E = 270$ и 300 кэВ, дозы $\Phi = 2 \cdot 10^{16} - 2 \cdot 10^{17}$ см⁻², интенсивности $I = 3.7 \cdot 10^{13}$ и $1.5 \cdot 10^{14}$ см⁻²·с⁻¹. Контрольные образцы (из той же технологической партии) облучены электронами $E = 900$ кэВ, $\Phi = 1.5 \cdot 10^{13}$ см⁻², $I = 1 \cdot 10^{14}$ см⁻²·с⁻¹.

Группа 2. $p^+ - n - n^+$ -Диоды изготовлены диффузией бора в воздухе. Исходный *n*-кремний fz, $\rho = 500$ Ом·см. Концентрация остаточных ГЦ $N_r \approx 5 \cdot 10^{10}$ см⁻³. Образцы облучены электронами $E = 270$ кэВ, $\Phi \approx 10^{19}$ см⁻², $I = 1.5 \cdot 10^{-4}$ см⁻²·с⁻¹.

Результаты измерений и их обсуждение

На рис. 1 показан типичный спектр DLTS. Сразу после облучения наблюдались пики 1, а и 2, а. Для пика 1, а температурная зависимость времени термоионизации $\tau(T)$ совпадает с зависимостью $\tau(T)$ для А-центров (комплекс V—O) [7, 8]. Поэтому мы идентифицируем пик 1, а как А-центр. Пик 2, а измерялся после переключения от высокого уровня инжекции до обратного напряжения. Для пика 2, а зависимость $\tau(T)$ совпадает с зависимостью $\tau(T)$ для донорного уровня межузельного углерода C_i ($E_p + 0.3$ эВ) [7, 9-12]. Концентрация межузельного углерода $N(C_i)$ и его концентрация, измеренная по перезарядке донорного уровня $N(C_i)_{изм}$, связаны соотношением

$$N(C_i)_{изм} = N(C_i) \frac{\sigma_p}{\sigma_p + \sigma_n}, \quad (1)$$

где σ_p , σ_n — сечения захвата дырки, электрона [3, с. 25].

После отжига (75 °С, 3 ч) (или после выдержки при комнатной температуре несколько суток) пик 2, а исчезает, а пик 1, а возрастает до 1,б, что

объясняется переходом части C_i в конфигурационно бистабильный комплекс C_i-C_s [10, 13, 14]¹ (рис. 2, точки А и В). Для акцепторного уровня C_i-C_s зависимость $\tau(T)$ совпадает с зависимостью $\tau(T)$ для А-центра [16]. Появился также пик 3, б. Используя соотношение (1) и учитывая неравенство $N(C_i-C_s) < N(C)_i$, получаем $\sigma_p/\sigma_n < 0.2$.

После отжига (270 °С, 5 ч) пик 1, б уменьшился до первоначального значения 1, а, а пик 3, б возрос до 3, в. В этом режиме происходит отжиг C_i-C_s [13, 16], а концентрация А-центров остается прежней. После отжига (410 °С, 1 ч) пики 1, а и 3, в исчезают. Аналогичные результаты получены и на других образцах, включая контрольные.

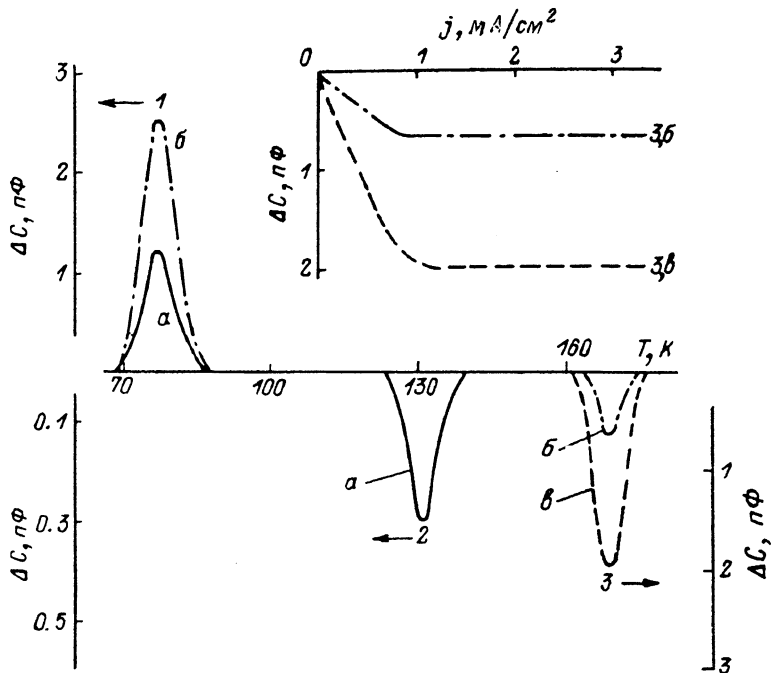


Рис. 1. Спектр DLTS для образцов группы 1.

$E = 270$ кэВ, $\Phi = 2 \cdot 10^{17}$ см⁻², $I = 1.5 \cdot 10^{14}$ см⁻²·с⁻¹. а — сразу после облучения; б — после отжига 75 °С, 3 ч; в — после отжига 270 °С, 5 ч. Масштаб ΔC для разных РД указан направлением стрелок. На вставке — зависимость амплитуды пика 3 от плотности прямого тока.

Рассмотрим природу пика 3. Его энергетический уровень, определенный из зависимости $\tau(T)$ [без учета зависимости $\sigma_p(T)$], $E = E_v + (0.36 \pm 0.02)$ эВ. В этом узком интервале энергий могут находиться уровни двух РД: К-центра (комплекс $C-O_i$ [17] или COV_2 [18]) и донорного уровня C_i-C_s [10-12], причем в кремнии Cz преобладает К-центр, а в кремнии fz — комплекс C_i-C_s . Если пик 3, б соответствует донорному уровню C_i-C_s , то справедливо соотношение, аналогичное (1), причем концентрация C_i-C_s определяется по разности амплитуд пиков 1, б и 1, а. Тогда для донорного уровня C_i-C_s получаем $\sigma_p \approx \sigma_n$. Однако для донорного уровня, как правило, $\sigma_n > \sigma_p$. Кроме того, амплитуды пиков 3, б и 3, в не зависят от прямого тока уже при среднем уровне инжекции (в n -базе на границе с областью p^+ концентрация инжектированных дырок и равновесная концентрация электронов одного порядка), причем характер этой зависимости одинаков для обоих пиков (см. вставку на рис. 1). Такая зависимость имеет место при $\sigma_p > \sigma_n$ [19, гл. 3, § 2], в частности, для К-центра [8]. Далее, в ходе отжига C_i-C_s в интервале 180–280 °С пик 3 возрастает; в интервале 330–410 °С отжиг происходит в одну стадию (рис. 2), а при 410 °С РД отжигается полностью. По нашему мнению, совокупность этих результатов объясняется

¹ По данным работы [15], C_i переходит в комплекс $C_s-Si_i-C_s$.

тем, что пик β соответствует одному РД — K -центру, т. е. межузельный углерод участвует в образовании K -центра. Что же касается донорного уровня C_i-C_s , то он мог не наблюдаться нами потому, что ему соответствует энергия не $E_p \pm 0.35$ эВ, а $E_p + 0.09$ эВ [20], или/и потому, что он при инжекции не захватывает дырок ($\sigma_n \gg \sigma_p$). В образцах группы 2 после облучения спектр и концентрации остаточных ГЦ не изменились. После облучения образовались те же РД, что и в образцах группы 1, однако концентрация C_i-C_s на порядок меньше

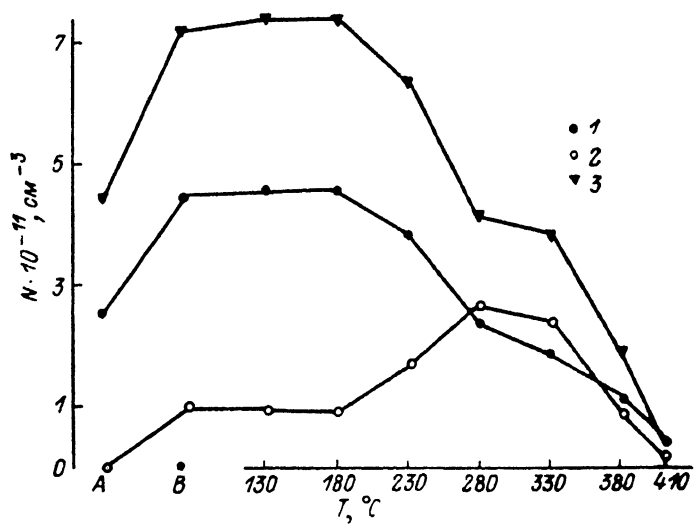


Рис. 2. Изменение концентрации РД для образцов группы 1 в ходе отжига.

A — сразу после облучения, B — после отжига (75 °C, 3 ч). От 130 °C — изохронный отжиг; $\Delta T = 50$ °C, $t = 1$ ч. $E, \text{кэВ}$: 1, 2 — 900, 3 — 300. $\Phi, \text{см}^{-2}$: 1, 2 — $1.5 \cdot 10^{22}$, 3 — $2 \cdot 10^{17}$. $I, \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$: 1, 2 — 10^{14} , 3 — 1.5×10^{14} . $I, 3$ — суммарная концентрация A-центров и C_i-C_s , 2 — концентрация K-центров.

концентрации A-центров. В ходе отжига ($T = 220$ °C, 1 ч) из A-центров образуются РД с уровнем $E_c - 0.36$ эВ; при отжиге (380 °C, 1 ч) оба эти РД отжигаются, а время жизни дырок в базе восстанавливается. Для РД с уровнем $E_c - 0.36$ эВ в наших образцах и в n -Si, облученном γ -квантами, зависимости $\tau(T)$ совпадают; близки также температуры образования и отжига [21]; мы считаем, что эти РД идентичны.

Таким образом, в n -кремнии, облученном электронами с энергией вблизи порога дефектообразования и с энергией порядка 1 МэВ, образуются идентичные РД.

Список литературы

- [1] Физические процессы в облученных полупроводниках / Под ред. Л. С. Смирнова. Новосибирск 1977. 255 с.
- [2] Sah C. T. // Sol. St. Electron. 1976. V. 19. N 12. P. 975—990.
- [3] Берман Л. С., Лебедев А. А. Емкостная спектроскопия глубоких центров в полупроводниках. Л., 1981. 176 с.
- [4] Lang D. V. // J. Appl. Phys. 1974. V. 45. N 7. P. 3023—3032.
- [5] Берман Л. С. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 5. С. 959.
- [6] Lax V., Neustadter S. F. // J. Appl. Phys. 1954. V. 25. N 5. P. 1148—1155.
- [7] Walker J. W., Sah C. T. // Phys. Rev. 1973. V. B7. N 10. P. 4587—4605.
- [8] Берман Л. С., Витман Р. Ф., Шуман В. Б. // ФТП. 1975. Т. 9. В. 2. С. 311—315.
- [9] 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.
- [10] Troxell J. R. // Sol. St. Electron. 1983. V. 26. N. 6. P. 539—548.
- [11] Lontos C. A. // Japan. J. Appl. Phys. 1988. V. 27. N 11. P. 2089—2093.
- [12] Ferenci G., Lontos C. A., Pavelka T., Somogi M. // J. Appl. Phys. 1988. V. 63. N 1. P. 183—189.
- [13] Murin L. I. // Phys. St. Sol. 1986. V. A93. N 1. P. K147—K149.
- [14] Кучинский П. В., Ломако В. М., Шахлевич Л. Н. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 7. С. 1213—1218.
- [15] O Donnel K. A., Lee K. M., Watkins G. D. // Physica. 1983. V. 116B. N 1-3. P. 258—263.

- [16] Jellison G. E. // J. Appl. Phys. 1982. V. 53. N 8. P. 5715—5719.
[17] Lee Y. H., Corbett J. W., Brower K. L. // Phys. St. Sol. 1977. V. A41. N 2. P. 637—642.
[18] Davies G. D., Oates A. S., Newman R. C., Wooley R., Lightowlers E. C., Birns M. J., Wilkes J. D. // J. Phys. 1986. V. C19. N 6. P. 841—855.
[19] Берман Л. С. Емкостные методы исследования полупроводников. Л., 1972. 104 с.
[20] Song L. W., Zhan X. D., Benson B. W., Watkins G. D. // Phys. Rev. Lett. 1988. V. 60. N 5. P. 460—463.
[21] Берман Л. С., Шуман В. Б. // ФТП. 1976. Т. 10. В. 9. С. 1755—1757.

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

Получена 30.05.1989
Принята к печати 3.07.1989