

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОБРАЗОВАНИЯ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В *p*-КРЕМНИИ, ВЫРАЩЕННОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Л. А. Казакевич, И. И. Колковский, В. И. Кузнецов, П. Ф. Лугаков,  
А. Р. Салманов

Научно-исследовательский институт прикладных проблем им. А. Н. Севченко, 220064,  
Минск, Беларусь

(Получена 5 апреля 1993 г. Принята к печати 21 апреля 1993 г.)

Изучены процессы накопления при облучении  $\gamma$ -квантами от источника  $^{60}\text{Co}$  компенсирующих рекомбинационно-активных радиационных дефектов в *p*-кремнии (удельное сопротивление  $\rho = 10 \div 20$  Ом·см), выращенном с использованием магнитного поля (*M-Si*). Экспериментальные результаты получены из измерения температурных зависимостей концентрации и времени жизни носителей заряда на различных этапах облучения и 15-минутного изохронного отжига. Показано, что при увеличении содержания растворенного кислорода в исследуемых кристаллах имеет место увеличение степени радиационного изменения концентрации и времени жизни носителей заряда, однако, коэффициенты, характеризующие изменение, оказываются ниже, чем в кремнии, полученном без воздействия на расплав магнитного поля. Результаты объясняются с учетом накопления при облучении кислородсодержащих комплексов междоузельной углерод—междоузельный кислород, междоузельный бор—междоузельный кислород и углерод—кислород—дивакансия. Скорость образования последних значительно меньше в *M-Si* из-за равномерного распределения кислорода и отсутствия углерод-кислородных ассоциаций.

Выращивание кремния в условиях воздействия на расплав магнитного поля позволяет регулировать содержание и распределение междоузельного кислорода  $[\text{O}]$ , входящего в состав большинства радиационных дефектов (РД), определяющих степень изменения электрофизических характеристик кристаллов при облучении частицами высоких энергий  $[4, 5]$ . В работе изучалось влияние условий получения кремния на эффективность образования РД, ответственных за компенсацию материала и рекомбинацию носителей заряда.

Исследовались легированные бором в концентрации  $N_B = (1 \div 2) \cdot 10^{15}$  см $^{-3}$  монокристаллы *p-Si* (диаметр 100 мм), полученные методом Чохральского в атмосфере аргона при воздействии на расплав постоянного продольного и (или) поперечного магнитного поля с индукцией  $0.05 \div 0.2$  Т (*M-Si*). В зависимости от величины и геометрии магнитного поля концентрация  $N_O$  оптически активного кислорода (полоса в спектре поглощения при  $\lambda = 9.1$  мкм) составляла величину от  $1.5 \cdot 10^{17}$  до  $1.3 \cdot 10^{18}$  см $^{-3}$ , а углерода (полоса при  $\lambda = 16.5$  мкм) во всех случаях не превышала  $N_C = 2 \cdot 10^{16}$  см $^{-3}$ . В качестве контрольного использовался выращенный без применения магнитного поля кремний с близкими значениями  $N_B$  и  $N_C$ , а  $N_O = (6 \div 8) \cdot 10^{17}$  см $^{-3}$ . Облучение осуществлялось  $\gamma$ -квантами от источника  $^{60}\text{Co}$  при температуре  $T_r < 50$  °С, а 15-минутной изохронный отжиг проводился в интервале температур  $T_a = 100 \div 500$  °С. Анализировались дозовые (температура измерения  $T_m = 300$  К) и температурные (в интервале  $T_m = 80 \div 400$  К) зависимости концентрации  $p$  (метод Ван-дер-Пау) и времени жизни  $\tau$  (метод Шпитцера, фотомагнитоэлектрический эффект) носителей заряда.

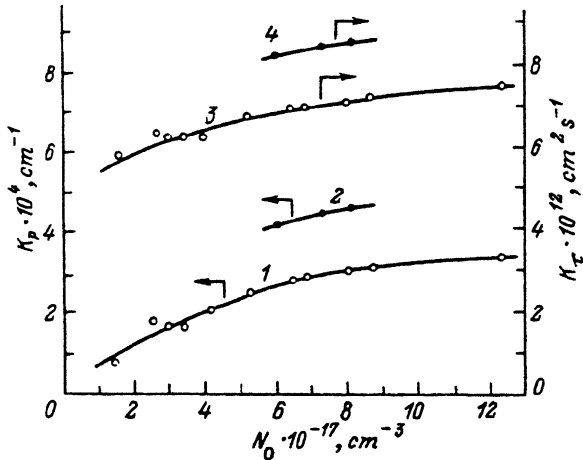


Рис. 1. Зависимости коэффициентов радиационного повреждения концентрации (1, 2) и времени жизни (3, 4) носителей заряда от содержания кислорода в *M-Si* (1, 3) и контрольных кристаллах (2, 4).

В результате облучения в исследуемых материалах наблюдается уменьшение  $p$  и  $\tau$ . Сведения об интегральной скорости образования РД были получены из коэффициентов  $K_p = \Delta p / \Phi$  и  $K_\tau = \Delta \tau^{-1} / \Phi$  радиационного повреждения электрофизических характеристик кремния, рассчитанных на начальных участках линейного изменения величин  $\Delta p = p_0 - p_\Phi$  и  $\Delta \tau^{-1} = \tau_\Phi^{-1} - \tau_0^{-1}$  с ростом интегрального потока  $\Phi$   $\gamma$ -квантов ( $p_0, \tau_0$  и  $p_\Phi, \tau_\Phi$  — значения концентрации и времени жизни носителей заряда соответственно до и после облучения). На рис. 1 приведены зависимости  $K_p$  и  $K_\tau$  от концентрации растворенного кислорода, из

которых следует, что при увеличении  $N_0$  имеет место возрастание  $K_p$  и  $K_\tau$ , причем их значения для *M-Si* оказываются более низкими по сравнению с контрольным материалом. На рис. 2 показаны типичные зависимости доли неотожженных дефектов  $f_p = (p_0 - p_T) / (p_0 - p_\Phi)$  и  $f_\tau = (\tau_0 - \tau_T) / (\tau_0 - \tau_\Phi)$  от температуры отжига ( $p_T, \tau_T$  — концентрация и время жизни носителей заряда на различных этапах отжига). Как видно, можно выделить 3 стадии восстановления  $p$  и  $\tau$  ( $T_a = 200 \div 250$ ,  $T_a = 300 \div 400$  и  $T_a \geq 450$  °C) и стадию так называемого отрицательного отжига при  $T_a = 100 \div 200$  °C, когда в действительности происходит дополнительное образование РД.

Анализ температурных зависимостей  $p$  показывает, что при облучении контрольного кремния и *M-Si* уменьшается концен-

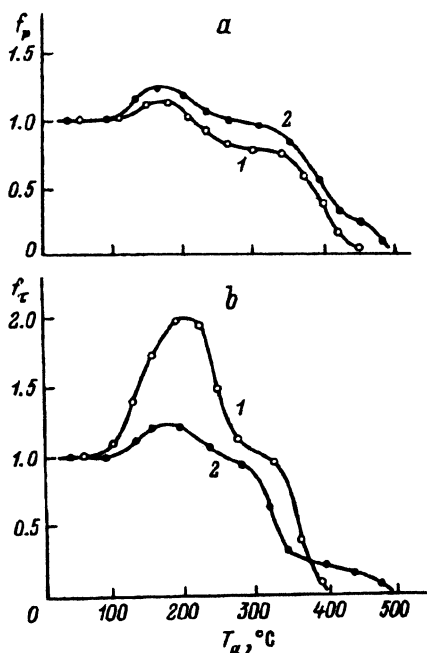


Рис. 2. Зависимости доли неотожженных дефектов от температуры отжига в *M-Si* (1) и контрольных кристаллах (2).  $\Phi, \text{см}^{-2}$ : а —  $3.5 \cdot 10^{18}$ , б —  $3 \cdot 10^{16}$ .  $N_0 = (7 \div 8) \cdot 10^{17} \text{см}^{-3}$ .

рация атомов бора в узлах решетки (акцепторный уровень  $E_v + 0.045$  эВ), а также образуются компенсирующие дефекты, создающие в запрещенной зоне энергетические уровни  $E_v + 0.35$  и  $E_v + 0.30$  эВ. В таблице приведены скорости уменьшения концентрации атомов бора в узлах,  $\nu_B = \Delta N_B / \Phi$ , и образования при облучении РД  $\eta = N / \Phi$  ( $\eta_{0.35}$  и  $\eta_{0.30}$ ) в кристаллах с различным содержанием кислорода и бора ( $N$ ,  $\Delta N_B$  — концентрации РД и вытесненных из узлов атомов бора соответственно). Отметим, что с ростом  $N_O$  увеличиваются скорости образования всех РД, тогда как от  $N_B$  зависит лишь  $\nu_B$ .

Скорости образования радиационных дефектов

$N_B \cdot 10^{-15}$ , см <sup>-3</sup>	$N_O \cdot 10^{-17}$ , см <sup>-3</sup>	$\eta_{0.35} \cdot 10^4$ , см	$\eta_{0.30} \cdot 10^4$ , см	$\nu_B \cdot 10^5$ , см <sup>-1</sup>
М-кремний				
1.5	3.0	1.4	<0.1	1.7
1.5	6.5	2.2	<0.1	3.1
1.5	8.0	2.4	<0.1	3.6
1.1	6.5	2.2	<0.1	2.9
1.8	6.5	2.2	<0.1	4.0
Контрольный кремний				
1.4	6.0	2.2	1.2	2.7
1.4	8.1	2.4	1.4	3.3
1.2	8.1	2.4	1.4	2.9

Примечание.  $\eta_{0.35}$  и  $\eta_{0.30}$  относятся к дефектам и энергетическим уровням соответственно  $E_v + 0.35$  эВ и  $E_v + 0.30$  эВ.

На основании полученных данных об энергетическом спектре уровней РД, характере и температуре их отжига (рис. 2), а также зависимости скорости образования РД от концентрации кислорода и бора (см. таблицу) можно сделать заключение о том, что при облучении в кремнии формируются комплексы междоузельный бор—междоузельный кислород  $B_iO_j$  с уровнем  $E_c - 0.26$  эВ, разрушающиеся в процессе отжига при  $T_a = 200 \div 250$  °С [6, 7], междоузельный углерод—междоузельный кислород  $C_iO_j$  ( $E_v + 0.35$  эВ,  $T_a = 300 \div 400$  °С) [6, 9] и углерод—кислород—дивакансия  $COVV$  ( $E_v + 0.30$  эВ,  $T_a \geq 400$  °С) [10, 11]. В процессе отжига при  $T_a = 100 \div 200$  °С происходит образование комплексов  $C_iO_j$  и  $COVV$  [7, 10, 11], а доля комплексов  $B_iO_j$ , перестраивающихся ( $T_a = 200 \div 250$  °С) в  $B_iC_s$  и  $B_iV_s$ , мала при  $N_C = 2 \cdot 10^{16}$  и  $N_B = (1 \div 2) \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup> [6, 7].

Как следует из приведенных в таблице данных, в контрольном образце М-Si совпадают зависимости скоростей образования комплексов  $C_iO_j$ , а также  $B_iO_j$  от концентрации бора и кислорода ( $\eta_{B_iO_j} \cong \nu_B$ ), так как другие боросодержащие РД при облучении в исследуемых материалах практически не образуются [6, 7]. Поэтому различие в значениях  $K_p$  и  $K_t$  (рис. 1) связано лишь с зависимостью от условий выращивания кристаллов эффективности введения комплексов  $COVV$ . Объясняется это, по нашему мнению, тем, что воздействие на расплав магнитного поля приводит к изменению не только концентрации междоузельного кислорода, но и содержания его в других состояниях. Так, при уменьшении концентрации кислорода и его более однородном распределении в расплаве должно происходить уменьшение вероятности образования кислородных комплексов, в том числе ассоциаций  $C_sO_i$  [12], при взаимодействии с которыми генерируемых облучением вакансий и образуются комплексы  $COVV$  [10]. Это в конечном итоге обуславливает наблюдаемые на опыте более низкие значения  $\eta_{COVV}$ , а тем самым  $K_p$  и  $K_t$  в р-кремнии, выращенном с использованием магнитного поля.

- [1] А. Н. Бузынин, Е. А. Королева. Зарубежная электронная техника, вып. 2. 68 (1985).
- [2] О. В. Пелевин, В. П. Гришин. Metallurgia цветных металлов, 19, 49 (1989).
- [3] V. Ohwa, T. Higuchi, E. Toji. Semiconductor silicon (1986). Proc. 5th Int. Symp. on Silicon Mater. Science and Technol., 117. Boston (1986).
- [4] В. В. Емцев, Т. В. Машовец. Примеси и точечные дефекты в полупроводниках, 248. М. (1981).
- [5] Физические процессы в облученных полупроводниках (под ред. Л. С. Смирнова), 256. Новосибирск (1977).
- [6] P. J. Drevinsky, C. E. Cafer, S. P. Tobin, J. C. Mikkelsen, L. C. Kimerling. Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 104. 164. Pittsburgh (1988).
- [7] P. J. Drevinsky, C. E. Cafer, L. C. Kimerling, J. L. Bentor. Def. Contr. Semicond, 341. Amsterdam (1990).
- [8] M. T. Asom, J. T. Benton, R. Sauer, L. C. Kimerling. Appl. Phys. Lett., 51, 256 (1987).
- [9] J. M. Trombetta, G. D. Watkins. Appl. Phys. Lett., 51, 1103 (1987).
- [10] Y. H. Lee, J. W. Corbett, K. L. Brower. Phys. St. Sol. (a), 41, 637 (1977).
- [11] P. M. Mooney, L. J. Cheng, M. Suli, J. D. Gerson, J. W. Corbett. Phys. Rev. B, 15, 3836 (1977).
- [12] A. R. Bean, R. C. Newman. J. Phys. Chem. Sol., 33, 255 (1972).

Редактор Л. В. Шаронова

---