

качественную сторону их структурного преобразования. Нет сомнения, что собственные дефекты кристаллической решетки, генерируемые радиацией, принимают участие в указанных процессах. Оценки показывают, что при использованных дозах  $\gamma$ -облучения концентрация таких дефектов составляет до 10 % от полной концентрации образующихся ТД.

Дальнейшие исследования выявят роль собственных дефектов в процессах преципитации кислорода, однако их участие в ускоренном движении атомов кислорода пока не подкрепляется полученными экспериментальными данными; в противном случае концентрация ТД при горячем облучении могла бы быть больше, чем в контрольных образцах. Поэтому участие собственных дефектов в структурном преобразовании ТД представляется более реальным, хотя бы и путем косвенных квазихимических реакций (например, в самом простом случае подмешиванием к процессам «выдавливания» собственных межузельных атомов при снятии упругих напряжений вокруг растущих преципитатов [2, 8]).

#### Список литературы

- [1] Kaiser W., Frisch H. L., Reiss H. // Phys. Rev. 1958. V. 112. N 5. P. 1546.
- [2] Bourret A. // Proc. 13 Int. Conf. «Defects in Semicond.» / Ed. by L. C. Kimerling, Y. M. Parsey, Jr. USA, 1985. P. 129—146.
- [3] Markevich V. P., Makarenko L. F., Murin L. L. // Mater. Sci. Forum. V. 38—41. Pt 2. Switzerland—Germany—UK—USA. 1989. P. 589—594.
- [4] Newman R. C., Tucker J. H., Livingston F. M. // J. Phys. C. 1983. V. 16. P. 151—156.
- [5] Emtsev V. V., Daluda Yu. N., Gaworzewski P., Schmalz K. // Phys. St. Sol. (a). 1984. V. 85. P. 575—584.
- [6] Далуда Ю. Н., Емцев В. В., Кервалишвили П. Д., Петров В. И., Шмальц К. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 7. С. 1283—1288.
- [7] Daluda Yu. N., Emtsev V. V., Schmalz K. // Rad. Eff. 1989. V. 107. N 2-4. P. 93—99.
- [8] Claybourn M., Newman R. C. // Mater. Sci. Forum. V. 38—41. Pt 2. Switzerland—Germany—UK—USA, 1989. P. 613—618.

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

Получено 26.09.1989  
Принято к печати 4.10.1989

ФТП, том 24, вып. 2, 1990

## О ВЛИЯНИИ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ НА КИНЕТИКУ ОБРАЗОВАНИЯ ТЕРМОДОНОРОВ В КРЕМНИИ

Литвинов В. В., Пальчик Г. В., Уренев В. И.

Работа посвящена выяснению роли собственных дефектов структуры в процессе формирования термодоноров (ТД) в кремнии.

Исследовались монокристаллы кремния  $n$ -типа ( $\rho \approx 60 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ) с концентрацией межузельного кислорода ( $O_i$ )  $9 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Содержание  $O_i$  определялось по интенсивности полосы поглощения излучения в области 9 мкм с использованием калибровочного множителя  $3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$  [1]. Облучение исходных кристаллов проводилось при комнатной температуре быстрыми электронами ( $E = 4 \text{ МэВ}$ ) в интервале потоков  $\Phi = 1 \cdot 10^{16} \div 3 \cdot 10^{17} \text{ эл/см}^2$ . Часть облученных образцов подвергалась предварительному отжигу при 270 °С в течение 184 ч. После этого исходные кристаллы и две группы облученных образцов проходили одновременную термообработку при 440 °С.

На рис. 1 представлены типичные температурные зависимости концентрации электронов ( $n$ ) в трех типах образцов на различных стадиях их термообработки при 440 °С. Анализ  $n(T)$  показывает, что в первые 7 ч выдержки облученных образцов при 440 °С завершается отжиг электрически активных радиационных дефектов (РД). Концентрация же вводимых ТД, которая отождествлялась с концентрацией уровней вблизи  $E_c - 0.15 \text{ эВ}$ , увеличивается со временем термо-

обработки и зависит от предыстории образца. Эти зависимости наглядно представлены кинетическими кривыми на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что предварительное облучение Si приводит к уменьшению как начальной скорости введения ТД, так и их максимально достигаемой концентрации ( $N_{ТД}^m$ ). При этом степень радиационного торможения процесса образования ТД увеличивается с потоком облучения образцов электронами и при понижении температуры отжига РД от 440 до 270 °С (ср. кривые 2 и 3). Это значит, что эффективность радиационного подавления процесса формирования ТД определяется не только числом, но и условиями отжига РД. Все три представленные на рис. 2 зависимости концентрации ТД ( $N_{ТД}$ ) от времени ( $t$ ) термообработки кристаллов при 440 °С описываются экспоненциальным законом  $N_{ТД}(t) = N_{ТД}^m [1 - \exp(-\alpha t)]$  с одинаковой для трех групп образцов постоянной  $\alpha \approx 3 \cdot 10^{-6} \text{ см}^{-1}$ . Одинаковость  $\alpha$  свидетельствует о тождественности природы

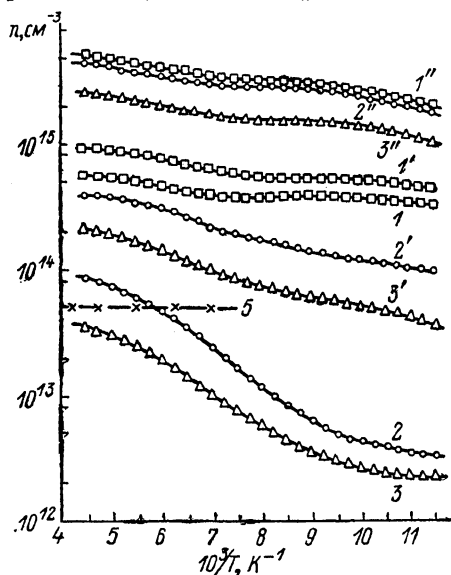


Рис. 1. Температурная зависимость концентрации свободных электронов ( $n$ ) при различных длительностях термообработки ( $T = 440^\circ\text{C}$ ) исходных (1) и облученных при комнатной температуре быстрыми электронами ( $E = 4 \text{ МэВ}$ ,  $\Phi = 3 \cdot 10^{17} \text{ эл/см}^2$ ) (2, 3) кристаллов Si, один из которых (3) после облучения отожжен при  $270^\circ\text{C}$  в течение 184 ч, зависимость  $n(T)$  для исходного кристалла (5).

$t$ , ч: 1—3 — 4, 1'—3' — 7, 1''—3'' — 91.

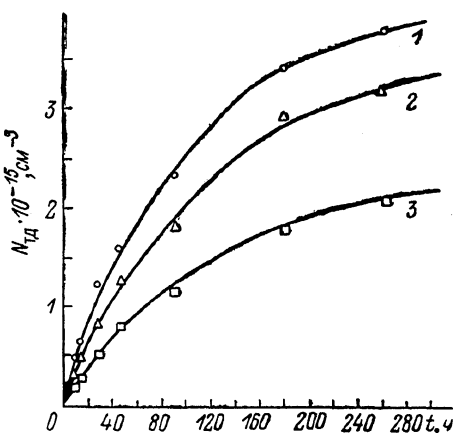


Рис. 2. Кинетика накопления термодиффузионных дефектов при  $440^\circ\text{C}$  в кристаллах Si.

1 — исходный кристалл, 2, 3 — кристаллы, предварительно облученные электронами ( $\Phi = 3 \times 10^{17} \text{ эл/см}^2$ ) с последующим отжигом 184 ч при  $270^\circ\text{C}$  (3).

ТД в исходных и облученных кристаллах. Наблюдаемое же различие в кинетике формирования ТД между различными группами образцов связано с изменением величины  $N_{ТД}^m$ , которая, как известно [2], пропорциональна  $[O_i]^3$ . Тогда, используя отношение  $N_{ТД}^m(\text{исх})/N_{ТД}^m(\text{обл}) = [O_i]^3(\text{исх})/[O_i]^3(\text{обл})$ , мы на основании данных рис. 2 приходим к выводу о том, что для реакции образования ТД потеря  $O_i$  за счет облучения составляет  $\sim 2.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , а за счет облучения и предварительного отжига образцов при температуре  $270^\circ\text{C}$  равна  $\sim 1.4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ .

Таким образом, радиационное подавление процесса образования ТД в Si может быть объяснено тем, что при формировании и отжиге РД часть растворенного кислорода переходит в связанное состояние. На основании данных радиационной физики Si этот процесс может быть представлен содержащимися в таблице реакциями. По нашим наблюдениям и данным других авторов (см., например, [3]), скорость введения VO-комплексов (A-центров) при облучении исследуемых кристаллов электронами с энергией 4 МэВ составляет  $\sim 0.16 \text{ см}^{-1}$ . Это значит, что для относящегося к данным рис. 2 потока облучения  $3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$  концентрация вводимых A-центров равна  $\sim 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Далее, предложенная схема реакций учитывает двухстадийность изотермического отжига A-центра [4],

Кристаллы (соответствие кривым рис. 2)	Вид воздействия		
	облучение	отжиг при 270 °С	термообработка при 440 °С (7 ч)
2	} $O_i + V \rightarrow VO$ (1)	—	$VO \rightarrow V + O_i$ (4) и (или) $VO + I \rightarrow O_i$ (5)
3		$VO + O_i \rightarrow VO_2$ (2)	$VO_2 + O_i \rightarrow VO_3$ (3)

которая связана с существованием двух основных механизмов его исчезновения. На первой изотермической стадии ( $<300$  °С) исчезновение А-центра идет по реакции (2) с образованием  $VO_2$ -комплексов с полосой  $889 \text{ см}^{-1}$  [5]. Эти комплексы неустойчивы при температуре  $\sim 400$  °С и преобразуются [реакция (3)] менее чем за 10 ч термообработки в комплексы  $VO_3$  с полосой  $978 \text{ см}^{-1}$  [5]. Конверсия А-центров в  $VO_3$ -комплексы связана с потерей  $O_i$  в концентрации  $\sim 1.5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , что согласуется с величиной убыли  $O_i$ , рассчитанной нами выше из соотношения для кривых 1 и 3 (рис. 2). Хорошее количественное согласие наблюдается и для потерь  $O_i$  при сопоставлении кривых 1 и 2, если, согласно данным работы [4], считать, что на высокотемпературной ( $>350$  °С) стадии отжига А-центра восстановление междоузельного кислорода составляет примерно половину от числа отжигающихся  $VO$ -комплексов. Механизм отжига А-центра на высокотемпературной стадии нельзя считать установленным. В качестве возможных вариантов представляется диссоциация  $VO$ -комплексов по реакции (4) и (или) их аннигиляция [реакция (5)] с собственными междоузельными атомами (1), которые образуются либо при развале РД междоузельного типа, либо в процессе ранней преципитации  $O_i$  по реакции  $O_i + O_i \rightarrow O_2 + I$  [6].

Полученные результаты исключают непосредственное участие кислородно-вакансионных комплексов в процессе образования ТД в Si. Кроме того, подтверждается и то, что исходным продуктом для реакции образования ТД являются атомы не связанного, а растворенного в решетке кислорода. Участие же собственных междоузельных атомов кремния в формировании ТД представляется возможным при условии, что их генерация идет непосредственно в процессе преципитации  $O_i$  [6].

#### Список литературы

- [1] Lizuka T., Takasu S., Tajima M., Arai T., Nazaki M., Inoue M., Watanabe M. // Proc. Symp. «Defects in Silicon». San Francisco, 1983. P. 265—274.
- [2] Wruck D., Gaworzewski P. // Phys. St. Sol. (a). 1979. V. 56. P. 557—564.
- [3] Козлов И. П., Логвиненко Г. А., Лугаков П. Ф., Ткачев В. Д. // ФТП. 1974. Т. 8. В. 8. С. 1431—1435.
- [4] Tipping A. K., Newman R. C., Newton D. C., Tucker J. H. // Mater. Sci. Forum Volus «Defects in Semiconductors» / Ed. by H. J. van Bardeleben. 1986. P. 887—892.
- [5] Lindstrom J. L., Oehrlin G. S., Corbett J. W. // Phys. St. Sol. (a). 1986. V. 95. N 1. P. 179—184.
- [6] Henry A., Saminadayar K., Pautrat J. L., Magnea N. // Phys. St. Sol. (a). 1988. V. 107. N 1. P. 101—110.

Белорусский государственный университет  
им. В. И. Ленина  
Минск

Получено 24.07.1989  
Принято к печати 6.10.1989