

ВЛИЯНИЕ ТЕРМОДОНОРОВ НА РАДИАЦИОННОЕ ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЕ В КРЕМНИИ

Нейман В. Б., Сирацкий В. М., Соснин М. Г.,
Шаховцов В. И., Шиндич В. Л.

Методами ИК спектроскопии, нестационарной емкостной спектроскопии и по эффекту Холла исследовано влияние кислородосодержащих термодоноров (ТД), образующихся в n -Si при 450 °С, на кинетику накопления A -, E - и V_2 -центров. Показано отсутствие влияния ТД (при $N_{\text{ТД}} = 10^{13} \div 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) на генерацию этих РД в диапазоне доз электронного ($E_e = 3 \text{ МэВ}$) облучения $10^{13} \div 1.4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$. Обнаружено аномальное уменьшение подвижности носителей тока в облученном кремнии, содержащем ТД. Полученные результаты объясняются отсутствием взаимодействия ТД с компонентами пар Френкеля, а также неоднородным распределением ТД в кремнии.

Термодоноры, образующиеся в кислородосодержащем кремнии при низкотемпературных термообработках (350—480 °С), изучаются уже более 30 лет, однако их природа до настоящего времени окончательно не установлена [1-3]. Важные сведения о природе термодоноров можно получить, исследуя их взаимодействие с точечными радиационными дефектами. Известно несколько работ, посвященных таким исследованиям [4-9], но их результаты носят неполный и во многом противоречивый характер, что не позволяет сделать однозначных выводов. Поэтому целью настоящей работы является комплексное исследование особенностей радиационного дефектообразования в кремнии с различной концентрацией термодоноров.

Эксперимент. Исследования проводились на образцах, вырезанных из промышленного бездислокационного кремния марки КЭФ-45. Концентрация свободных носителей определялась из измерений эффекта Холла и при $T = 300 \text{ К}$ составляла $8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Содержание кислорода и углерода, определенное по ИК поглощению, составляло $N_O = (0.9 \div 1.2) \cdot 10^{18}$ и $N_C < 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ соответственно. Термодоноры (ТД) вводились посредством термообработки (ТО) на воздухе при 450 °С. Концентрация ТД находилась методом DLTS и из измерений эффекта Холла. В качестве контрольных выбирались образцы, легированные фосфором, с такой же концентрацией носителей, как и в термообработанных образцах.

Образцы облучались гамма-квантами ^{60}Co при $T < 70 \text{ °С}$, а также быстрыми электронами с $E = 3 \text{ МэВ}$ при $T < 100 \text{ °С}$, $I = 0.2 \text{ мкА/см}^2$. Накопление вторичных радиационных дефектов (ВРД) контролировалось по спектрам DLTS и ИК поглощения, а также по температурным зависимостям эффекта Холла в диапазоне температур 30—300 К.

Результаты. На рис. 1 приведены зависимости относительного изменения начальных скоростей введения A - и E -центров от концентрации ТД. Из рис. 1 следует, что во всем диапазоне возможных концентраций ТД не влияют на эффективность образования основных типов ВРД, содержащих вакансии. Следует подчеркнуть, что в аналогичном диапазоне изменения концентрации химических доноров, например фосфора, скорость введения A - и E -центров изменяется в 2 и 100 раз соответственно [10].

Влияние ТД на эффективность образования дивакансий исследовалось методом ИК поглощения. На рис. 2 приведены зависимости коэффициента погло-

щения дивакансиями на длине волны 1.8 мкм от длительности ТО при 450 °С. Из рис. 2 следует, что с ростом длительности ТО, т. е. с увеличением концентрации ТД, интенсивность полосы 1.8 мкм существенно падает. Такое влияние ТО

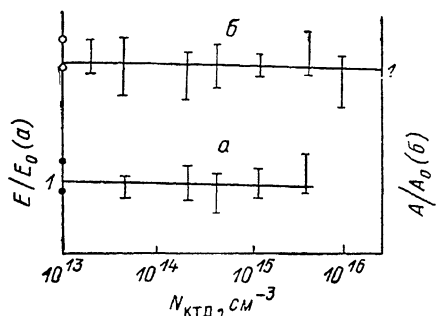


Рис. 1. Зависимости относительного изменения скоростей введения А- и Е-центров от концентрации термодоноров.

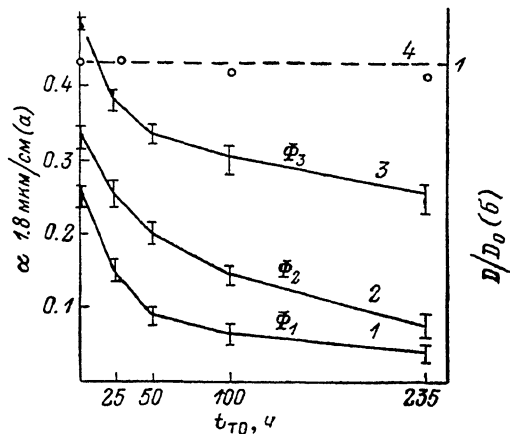


Рис. 2. Зависимости ИК поглощения на 1.8 мкм (а) и относительного изменения концентрации дивакансий (б) от длительности ТО при 450 °С. а — 1—3, б — 4. $\Phi_1=3.5 \cdot 10^{17}$, $\Phi_2=7 \cdot 10^{17}$, $\Phi_3=1.4 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$.

уменьшается при увеличении дозы облучения. Известно, что интенсивность полосы 1.8 мкм зависит от положения уровня Ферми [11]. Штрихами на рис. 2 показана зависимость относительного изменения концентрации дивакансий от длительности ТО, рассчитанная по ИКП, с учетом влияния ТД на положение уровня Ферми. Видно, что, как и в случае А- и Е-центров, эффективность накопления дивакансий практически не зависит от содержания ТД в образцах.

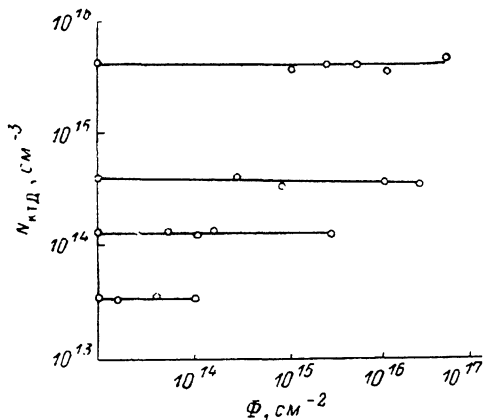


Рис. 3. Дозовые зависимости концентрации КТД-1 при электронном облучении.

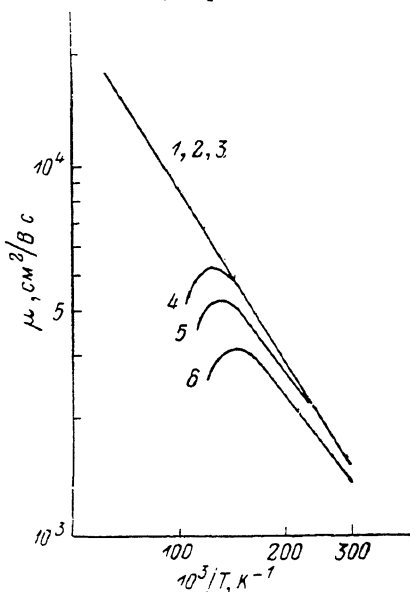


Рис. 4. Влияние КТД-1 на температурные зависимости холловской подвижности в кремнии.

$N_{КТД}, \text{ см}^{-3}$: 1 — 0; 2, 3, 6 — $5 \cdot 10^{16}$; 4, 5 — $5 \cdot 10^{14}$. $\Phi \cdot 10^{-16}, \text{ см}^{-2}$: 1, 2 — 0; 3, 5, 6 — 3; 4 — 1.

Уменьшение влияния ТД на ИКП на 1.8 мкм с ростом дозы облучения обусловлено их электрической компенсацией накапливающимися ВРД.

Параллельно с изучением влияния содержания ТД на накопление дивакансий на тех же образцах по ИК поглощению на длине волны 11.2 мкм контроли-

ровалось накопление А-центров в диапазоне доз электронного облучения $(3.5 \div 14) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$. В данном диапазоне дозовые зависимости концентрации дивакансий и А-центров имеют существенно нелинейный вид. Однако и при таких условиях облучения эффективность накопления этих центров не зависит от концентрации ТД.

На рис. 3 показаны дозовые зависимости концентрации ТД при электронном облучении. Видно, что в исследованном диапазоне доз концентрация ТД не изменяется.

Нами исследовано также влияние ТД на поведение температурных зависимостей холловской подвижности в облученных образцах (рис. 4). Из рис. 4 следует, что ТД не влияют на температурную зависимость подвижности в необлученном кремнии. Однако в облученном кремнии с ТД наблюдается резкое уменьшение подвижности в области температур фононного рассеяния. Характерно, что точка перегиба на температурной зависимости подвижности сдвигается в область высоких температур при увеличении как дозы облучения, так и концентрации ТД. Такое поведение подвижности не удается описать в рамках классического механизма рассеяния на заряженных центрах.

Обсуждение результатов. Отсутствие в эксперименте влияния ТД на накопление основных вакансионных радиационных комплексов свидетельствует о том, что вакансии не взаимодействуют с ТД или вероятность их взаимодействия с ТД значительно меньше, чем с кислородом или фосфором.

Неизменность концентрации ТД при достаточно больших дозах облучения позволяет предположить, что ТД не взаимодействуют и с межузельными атомами кремния.

Отсутствие взаимодействия ТД с компонентами пары Френкеля, на наш взгляд, является нетривиальным свойством ТД, обусловленным спецификой их структуры, ранее не учитывавшимся при разработке и анализе моделей термодоноров. Действительно, заряженные отрицательно в *n*-Si вакансии эффективно взаимодействуют с положительно заряженными химическими донорами V группы, образуя E-центры. Можно предположить, что отсутствие взаимодействия ТД с вакансиями обусловлено существованием вблизи ТД потенциального барьера для вакансий. Вероятно, что такой барьер обусловлен упругими силами.

Влияние ТД на температурные зависимости подвижности в облученном кремнии качественно можно объяснить в предположении их неоднородного распределения в решетке кремния. Не исключено, что с неоднородностью распределения ТД связано и отсутствие их взаимодействия с радиационными дефектами.

Авторы выражают благодарность Т. В. Машовец за полезное и плодотворное обсуждение результатов данной работы.

Л и т е р а т у р а

- [1] Kaiser W., Frish H. L., Reiss H. // Phys. Rev. 1958. V. 118. N 5. P. 1546.
- [2] Машовец Т. В. // ФТП. 1982. Т. 16. В. 1. С. 3—18.
- [3] Bourret A. // Proc. III Int. Conf. Def. Semicond. N. Y., 1985. P. 129—146.
- [4] Папов В. И., Смирнов Л. С., Тишковский Е. Г. // ФТП. 1975. Т. 9. В. 8. С. 1580—1583.
- [5] Emtsev V. V., Daluda Yu. N., Gaworzewski P., Schmaltz K. // Phys. St. Sol. (a). 1984. V. 85. P. 575—584.
- [6] Fukuoka N., Saito H. // Sci. Rept. (Japan). 1984. V. 35. N 2. P. 5—13.
- [7] Akhmetov V. D., Bolotov V. V., Smirnov L. S. // Phys. St. Sol. (a). 1982. V. 72. N 2. P. K211—K216.
- [8] Benton V. L., Kimerling L. C., Stavola M. // Phys. Proc. 1983. V. BC116. P. 271—275.
- [9] Уваров Е. Ф., Чукичев М. В. // Радиационная физика неметаллических кристаллов. Киев, 1971. Т. 3. С. 305—311.
- [10] Cheng L. J., Corelli J. C., Watkins G. D. // Phys. Rev. 1966. V. 152. N 2. P. 761—774.

Институт физики АН УССР
Киев

Получена 11.07.1988
Принята к печати 19.09.1988