

Радиационное дефектообразование в кремнии, легированном германием, при низкотемпературном облучении

© Л.И. Хируненко, В.И. Шаховцов, В.В. Шумов

Институт физики Национальной академии наук Украины,
252650 Киев, Украина

(Получена 26 мая 1997 г. Принята к печати 9 июня 1997 г.)

Проведено исследование влияния легирования германием на эффективность образования основных вторичных радиационных дефектов в кремнии при низкотемпературном ($T \leq 90$ К) электронном облучении. Снижение эффективности образования A - и V_2 -центров в $\text{Si}\langle\text{Ge}\rangle$ в условиях эксперимента объясняется в предположении, что атомы германия являются центрами непрямо́й рекомбинации радиационных дефектов в $\text{Si}\langle\text{Ge}\rangle$.

Высокая вероятность взаимодействия атомов германия с вакансиями (V) в кремнии, а также дополнительные внутренние упругие напряжения, возникающие из-за различия ковалентных радиусов атомов Si и Ge , вызывают снижение эффективности образования основных вторичных радиационных дефектов (РД) в кристаллах, облученных при комнатной температуре [1–3]. Значительный интерес представляют исследования процессов дефектообразования в образцах $\text{Si}\langle\text{Ge}\rangle$, облученных при $T \leq 200$ К, когда образующиеся центры GeV термически стабильны и их влияние на образование вторичных РД должно быть существенным.

В данной работе приведены результаты исследований особенностей процессов радиационного дефектообразования в монокристаллах $\text{Si}\langle\text{Ge}\rangle$, облученных при $T \leq 90$ К. Исследовались выращенные методом Чохральского образцы кремния n -типа, специально не легированные и легированные германием с концентрацией $5 \cdot 10^{18} - 2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$, с удельным сопротивлением $\rho \approx 25 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Концентрация кислорода в исследуемых образцах изменялась в пределах $(7 \div 8) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$; концентрация углерода не превышала значения $(1 \div 2) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Облучение проводилось на линейном ускорителе электронами с энергией 3.5 МэВ и дозой $5 \cdot 10^{17} \div 1.2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ при $T \leq 90$ К.

На рис. 1 приведены сравнительные спектры ИК поглощения Si и $\text{Si}\langle\text{Ge}\rangle$ в области полос V_2 - и A -центров сразу после облучения. Как видно, легирование кремния германием приводит к значительному снижению эффективности образования A -центров и некоторому снижению эффективности образования дивакансий, т.е. основная часть образовавшихся при облучении вакансий захвачена в центры GeV .

Изохронный отжиг исследуемых образцов (длительностью $\Delta t = 15$ мин) показал, что повышение температуры до $T \approx 200 - 280$ К, при которой происходит диссоциация центров GeV , приводит к значительному увеличению интенсивности полосы поглощения A -центров в кристаллах $\text{Si}\langle\text{Ge}\rangle$. При этом наблюдается также некоторое увеличение интенсивности полосы поглощения дивакансий (рис. 1). Таким образом, основное образование

A -центров в $\text{Si}\langle\text{Ge}\rangle$ происходит не сразу после облучения, а после отжига центров GeV , когда высвобождающиеся вакансии взаимодействуют с атомами межузельного кислорода. При этом, по-видимому, часть вакансий взаимодействует между собой, образуя вторичные дивакансии, что приводит к некоторому увеличению интенсивности полосы поглощения дивакансий.

Обращает на себя внимание то обстоятельство, что концентрации A -центров и дивакансий в $\text{Si}\langle\text{Ge}\rangle$ (как сразу после облучения, так и после отжига центров GeV) значительно меньше, чем в Si . Это обстоятельство дает возможность, как и в [3], сделать предположение, что атомы Ge в условиях проводимого в данной работе эксперимента являются центрами непрямо́й рекомбинации первичных РД.

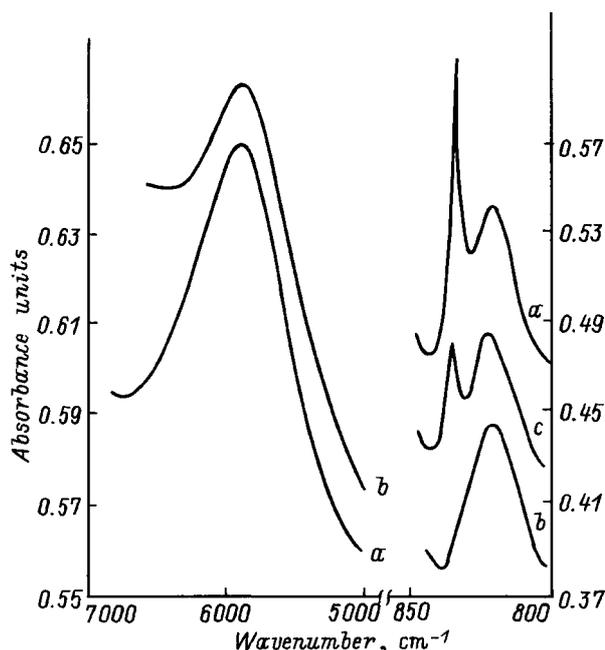
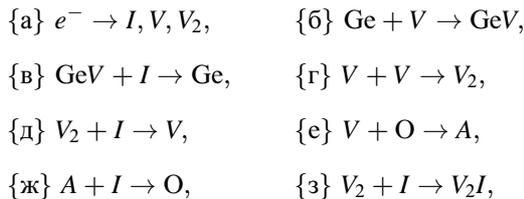


Рис. 1. Спектры ИК поглощения в области V_2 -центра и A -центра для Si (a) и $\text{Si}\langle\text{Ge}\rangle$ (b, c) ($N_{\text{Ge}} \approx 2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$), облученного электронами при $T \leq 90$ К. a, b — после облучения; c — после отжига при $T = 300$ К.

Основываясь на этом предположении, процессы образования вторичных РД можно описать с помощью системы квазимеханических уравнений.

Основными процессами при низкотемпературном электронном (e^-) облучении Si(Ge) являются следующие:



где {а} описывает процессы образования первичных V , V_2 и межузельных атомов I ; {б}–{з} описывают образование вторичных РД.

Учитывая указанные процессы, система квазихимических уравнений может быть записана в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{dN_I}{dt} &= \lambda_1 + 2\lambda_2 - \chi_{gI}N_gN_I - \chi_{AI}N_A N_I - \chi_{V_2I}N_{V_2}N_I - \frac{N_I}{\tau_I}, \\ \frac{dN_V}{dt} &= \lambda_1 - \chi_{GeV}N_{Ge}N_V - \chi_{VO}N_O N_V - 2\chi_{VV}N_V^2 + \chi_{V_2I}^*N_{V_2}N_I, \\ \frac{dN_g}{dt} &= \chi_{GeV}N_{Ge}N_V - \chi_{gI}N_gN_I; \\ \frac{dN_A}{dt} &= \chi_{VO}N_O N_V - \chi_{AI}N_A N_I, \\ \frac{dN_{V_2}}{dt} &= \lambda_2 + \chi_{VV}N_V^2 - \chi_{V_2I}N_{V_2}N_I. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь N_I , N_V , N_{V_2} , N_A — концентрации I , V , V_2 , A — дефектов; N_g — концентрация центров GeV; χ_{ij} — вероятность взаимодействия между центрами вида i и j ; τ_I — среднее время жизни межузельных атомов по отношению к прочим стокам, не учтенным в (1); λ_1 — скорость образования пар Френкеля; λ_2 — скорость образования первичных дивакансий.

Следует отметить, что при низкотемпературном облучении Si и Si(Ge) эффективно образуется как переориентируемая (V_2), так и непереориентируемая (V_2I) дивакансии, полосы ИК поглощения которых совпадают. Уравнение для V_2 -центров описывает изменение их суммарной концентрации (вероятность $\chi_{V_2I}^*$ соответствует процессу {д}, вероятность χ_{V_2I} соответствует сумме процессов {д} и {з}).

Выдвинутое предположение об атомах германия, как о центрах непрямої рекомбинации первичных РД, позволяет сделать следующие допущения:

$$\chi_{GeV}N_{Ge}N_V \gg 2\chi_{VV}N_V^2, \quad \lambda_1 \gg \chi_{V_2I}^*N_{V_2}N_I. \quad (2)$$

Используя квазистационарное приближение ($dN_I/dt = dN_V/dt = dN_g/dt = dN_A/dt = 0$) и допущения (2),

для равновесных концентраций вторичных РД при низкотемпературном ($T \leq 90$ К) облучении можно получить следующие выражения:

$$N_g \approx \frac{\lambda_1}{2\lambda_2\tau_I\chi_{gI}} \frac{\chi_{GeV}N_{Ge}}{\chi_{GeV}N_{Ge} + \chi_{VO}N_O}, \quad (3)$$

$$N_A \approx \frac{\lambda_1}{2\lambda_2\tau_I\chi_{AI}} \frac{\chi_{VO}N_O}{\chi_{GeV}N_{Ge} + \chi_{VO}N_O}, \quad (4)$$

$$N_{V_2} \approx \frac{1}{2\tau_I\chi_{V_2I}} \left\{ 1 + \frac{\chi_{VV}}{\lambda_2} \frac{\lambda_1^2}{(\chi_{GeV}N_{Ge} + \chi_{VO}N_O)^2} \right\}. \quad (5)$$

Для выяснения зависимости эффективностей образования (η) вторичных РД в Si(Ge) от содержания германия необходимо провести сравнение соответствующих величин в Si и Si(Ge). Пусть $\eta_{V_2} = N_{V_2}(N_{Ge})/N_{V_2}(0)$ — относительная эффективность образования дивакансий в Si(Ge) (отношение концентраций дивакансий в Si(Ge) и Si при $T \leq 90$ К). Используя (5), и предполагая, что вероятности реакций χ_{ij} между центрами i и j , а также скорости генерации первичных радиационных дефектов λ_1 и λ_2 одинаковы в Si и Si(Ge), относительную эффективность образования дивакансий в Si(Ge) можно записать в виде

$$\begin{aligned} \eta_{V_2} &\approx \left(1 + \frac{\chi_{VV}}{\lambda_2} \frac{\lambda_1^2}{\chi_{VO}^2 N_O^2} \right)^{-1} \\ &+ \left(1 + \frac{\chi_{VV}}{\lambda_2} \frac{\lambda_1^2}{(\chi_{GeV}N_{Ge} + \chi_{VO}N_O)^2} \right). \end{aligned} \quad (6)$$

Для того чтобы записать аналогичное выражение для А-центров, следует учесть, что концентрация А-центров при $T \leq 90$ К незначительна и процесс их образования завершается при $T \geq 280$ К. Концентрация А-центров при $T \geq 280$ К складывается из концентрации А-центров, образовавшихся при $T \leq 90$ К, и концентрации А-центров, образовавшихся при отжиге центров GeV ($T \geq 250$ К). Учитывая, что основным стоком для вакансий при отжиге центров GeV является кислород,

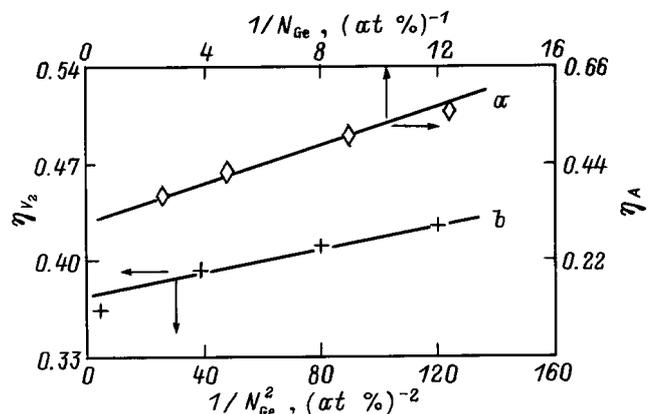


Рис. 2. Зависимость эффективности образования (η) А-центров (а) и V_2 -центров (б) в SiO(Ge) от концентрации германия после электронного облучения при $T \leq 90$ К.

концентрацию А-центров, образовавшихся при отжиге центров GeV, можно представить в следующем виде:

$$N_A = \beta \cdot N_g, \quad (7)$$

где β — коэффициент пропорциональности ($\beta \leq 1$), учитывающий захват вакансий иными стоками, кроме атомов кислорода, при отжиге центров GeV, и N_g определяется выражением (3). Тогда величина $\eta_A = N_A(N_{Ge})/N_A(0)$ — относительная эффективность образования А-центров в Si(Ge) при $T \geq 280$ К может быть представлена следующим выражением:

$$\eta_A \approx \beta \frac{\chi_{AI}}{\chi_{gl}} + \left(1 - \beta \frac{\chi_{AI}}{\chi_{gl}}\right) \frac{\chi_{VO}N_O}{\chi_{GeV}N_{Ge} + \chi_{VO}N_O}. \quad (8)$$

Анализ полученных выражений (6) и (8) показывает, что с ростом концентрации германия относительные эффективности образования А- и V_2 -центров в Si(Ge) уменьшаются: $\eta_A \propto 1/N_{Ge}$ и $\eta_{V_2} \propto 1/N_{Ge}^2$ при $\chi_{GeV}N_{Ge} \gg \chi_{VO}N_O$.

Сравнение экспериментальной и теоретической зависимостей относительной эффективности образования основных вторичных РД в Si(Ge) приведено на рис. 2. Как видно из рисунка, экспериментально определяемые зависимости относительной эффективности образования А-центров и дивакансий от концентрации германия демонстрируют удовлетворительное качественное согласие с соответствующими теоретическими зависимостями в предположении, что атомы германия являются центрами непрямого рекомбинации первичных радиационных дефектов.

Список литературы

- [1] А.А. Бугай, В.М. Максименко, Б.М. Туровский, Л.И. Хируненко, В.И. Шаховцов, Н.И. Горбачева. ФТП, **18**, 2020 (1984).
- [2] И.Г. Агабаев, М.С. Саидов, Л.И. Хируненко, В.И. Шаховцов, В.К. Шинкаренко, Л.И. Шпинар, А. Юсупов. ФТП, **21**, 570 (1987).
- [3] Л.И. Хируненко, В.И. Шаховцов, В.К. Шинкаренко, Л.И. Шпинар, И.И. Ясковец. ФТП, **21**, 562 (1987).

Редактор В.В. Чалдышев

The radiation defect formation in Ge-doped silicon under low-temperature irradiation

L.I. Khirunenکو, V.I. Shakhovtsov, V.V. Shumov

Institute of Physics
of National Academy of Sciences of Ukraine,
252650 Kiev, the Ukraine

Abstract An investigation of the influence of germanium doping ($\leq 1\%$ at.) on the formation efficiency of major secondary radiation defects in silicon at low-temperature ($T \leq 90$ K) electron irradiation has been carried out. A significant decrease of the formation efficiency of А- and V_2 -centers in Si(Ge) is explained in assumption that germanium atoms are indirect recombination centers of primary radiation defects (V and I) in Si(Ge).