

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРНЫХ ВРЕМЕН ФОРМИРОВАНИЯ НЕОДНОРОДНОГО ПРОФИЛЯ ВАКАНСИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В КРЕМНИИ У ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Болотов В. В., Стучинский В. А.

Путем измерения методом DLTS профилей концентрации А-центров, формирующихся в базе диодов Шоттки при облучении их электронами на импульсном ускорителе в условиях импульсного смещения диодов в обратном направлении, определены характерные времена  $t_{\text{хар}}$  формирования неоднородного распределения дефектов под действием электрического поля. Зависимость  $t_{\text{хар}}$  от параметров ОПЗ подтверждает дрейфовую модель происхождения профилей концентрации дефектов.

В работах [1, 2] было показано, что действие электрического поля при облучении приводит к формированию неоднородного распределения вакансионных дефектов в кремнии. В работе [2] при анализе возможных механизмов влияния поля на накопление дефектов был сделан вывод о том, что формирование неоднородного профиля обусловлено дрейфом вакансий ( $V^+$ ) и стоком их на границу раздела. Отмечалось, что действие поля приводит к образованию резко неоднородного профиля, если время дрейфа  $V^+$  через область пространственного заряда (ОПЗ) не превышает их времени жизни  $\tau_{V^+}$ .

Цель данной работы — при использовании импульсного характера дефектообразующего облучения определить характерные времена  $t_{\text{хар}}$  формирования неоднородного профиля концентрации дефектов под действием электрического поля. Представлялось возможным, изучив зависимость  $t_{\text{хар}}$  от величины электрического поля и толщины ОПЗ, получить дополнительные данные о механизме формирования профиля и на этой основе оценить время жизни и подвижность  $V^+$  в кремнии.

В эксперименте использовались образцы кремния КЭФ-1 ( $n=4.8 \cdot 10^{15}$ ,  $N_{O_T}=1.1 \cdot 10^{18}$ ,  $N_{C_s} \leq 2 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>) и КЭФ-7.5 ( $n=6.2 \cdot 10^{14}$ ,  $N_{O_T}=1.1 \cdot 10^{18}$ ,  $N_{C_s}=8 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>) из тех же слитков, что и в работе [2], а также образцы кремния марки КЭФ-4.5 с  $n=1.0 \cdot 10^{15}$ ,  $N_{O_T}=1.2 \cdot 10^{18}$ ,  $N_{C_s}=1.2 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>.

Диоды Шоттки, полученные напылением в вакууме на образцы золота, облучались на импульсном ускорителе электронами с энергией 3.5 МэВ. Длительность импульсного облучения составляла 3 мкс, частота повторения импульсов 100 Гц. Во время облучения на диоды подавались импульсы обратного смещения ( $U_{\text{см}}=8$  В) длительностью  $t_{\text{см}}$  от генератора прямоугольных импульсов, синхронизованного с ускорителем, причем величина задержки импульса смещения относительно начала импульса облучения не превышала 0.3 мкс (рис. 1). После облучения методом DLTS измерялось распределение в базе диодов концентрации А-центров ( $E_c-0.18$  эВ) [3]. Погрешность измерения концентрации дефектов составляла 5—7%. Изучалась зависимость формы профиля от  $t_{\text{см}}$ . Результаты представлены на рис. 2. Видно, что характерное время, в течение которого успевает формироваться неоднородное распределение А-центров в ОПЗ, уменьшается с увеличением уровня легирования базы диода

и составляет  $\sim 3, \sim 7-15, \sim 15-50$  мкс для кремния с  $\rho = 1, 4.5, 7.5$  Ом·см соответственно. Очевидно, результат следует объяснять либо в представлении о дрейфе заряженных вакансий в поле ОПЗ [2], либо в предположении о влиянии зарядового состояния вакансий на скорость образования А-центров.

При объяснении формирования неоднородного распределения А-центров различием зарядовых состояний вакансий в ОПЗ и квазинейтральном объеме кремния следует полагать, учитывая факт электрической нейтральности кислорода в кремнии, что при изменении зарядового состояния вакансий меняется скорее всего темп рекомбинации коррелированных пар Френкеля, а не скорость захвата вакансий на кислород [4, 5]. Между тем наблюдаемые величины  $t_{\text{хар}}$  слишком велики по сравнению с временем разделения френкелевских пар,

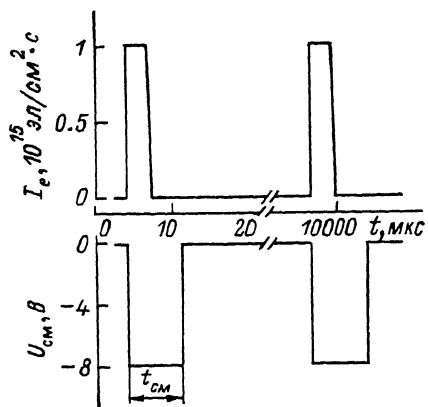


Рис. 1. Эшоры импульсов обратного смещения  $U_{\text{см}}(t)$ , подаваемых на диоды Шоттки при облучении их импульсами быстрых электронов  $I_e(t)$ .

что позволяет считать такой механизм формирования профиля концентрации А-центров маловероятным.

Полученные данные, однако, хорошо согласуются с представлением о том, что неоднородный профиль концентрации А-центров формируется в результате дрейфа заряженных вакансий в поле ОПЗ. При малых  $t_{\text{см}}$  длина дрейфа

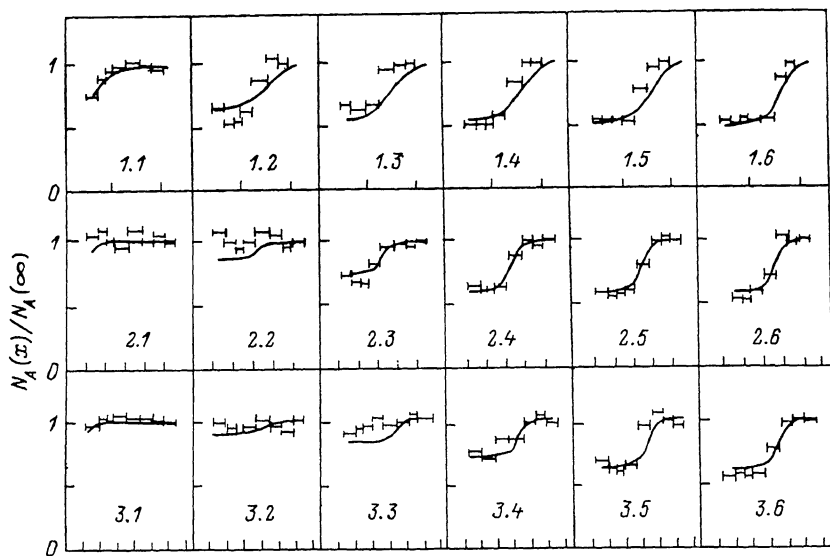


Рис. 2. Профили концентрации А-центров в базе диодов Шоттки, смещенных в обратном направлении ( $U_{\text{см}} = -8$  В) в течение времени  $t_{\text{см}}$  после начала импульса облучения.

Материал: 1.1—1.6 — КЭФ-1; 2.1—2.6 — КЭФ-4.5; 3.1—3.6 — КЭФ-7.5;  $t_{\text{см}}$ , мкс: 1.1, 2.1, 3.1 — 0; 1.2, 2.2, 3.2 — 3.5; 1.3, 2.3, 3.3 — 7; 1.4, 2.4, 3.4 — 15; 1.5, 2.5, 3.5 — 50; 1.6, 2.6, 3.6 —  $\infty$  (постоянное смещение). Штрихи по горизонтальной оси — через 1 мкм. Сплошные линии — результат расчета для  $\tau_{\text{т}} = 35$  мкс.

вакансий  $l_{\text{В}} = \mu E t_{\text{см}}$  мала по сравнению с толщиной ОПЗ  $h$  и действие поля не приводит к резко неоднородному распределению вакансий; в случае же  $t_{\text{см}} > t_{\text{хар}}$  дрейфовая длина превышает  $h$  и наблюдается резко неоднородное распределение А-центров. В этом случае  $t_{\text{хар}}$  следует отождествить с временем дрейфа  $V^+$  через ОПЗ  $t_{\text{др}}$ , которое при фиксированном  $U_{\text{см}}$  должно быть обратно пропорционально концентрации мелкой примеси  $N_{\text{м}} (t_{\text{др}} \approx h/v_{\text{др}} = h^2/\mu(U_{\text{к}} + U_{\text{см}}) \sim \sim 1/N_{\text{м}})$ , что и наблюдается экспериментально.

Пользуясь соотношением

$$\frac{\tau_{v+}}{t_{др}} = \frac{l_V^2/D}{h^2/\mu(U_{\kappa} + U_{см})} = \frac{e(U_{см} + U_{\kappa})}{kT} \frac{l_V^2}{h^2}$$

и полученным в [2] значением  $l_V = 0.3$  мкм, легко получить оценку  $\tau_{v+}$  в трех случаях (см. таблицу).

Проведенный согласно системе кинетических уравнений [2]

$$\frac{\partial N_{v+}}{\partial t} = g_{v+} + D_{v+} \frac{\partial^2 N_{v+}}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial}{\partial x} [E(x) N_{v+}(x)] - \frac{N_{v+}}{\tau_{v+}},$$

$$\frac{\partial N_{v0}}{\partial t} = g_{v0} + D_{v0} \frac{\partial^2 N_{v0}}{\partial x^2} - \frac{N_{v0}}{\tau_{v0}},$$

$$\frac{\partial N_A}{\partial t} = \frac{N_{v+}}{\tau_{v+}} + \frac{N_{v0}}{\tau_{v0}},$$

$$\tau_{v0} = \tau_{v+}, \quad D_{v0} = D_{v+}, \quad g_{v0} = g_{v+}, \quad E(x) = \frac{2U}{h} \left(1 - \frac{x}{h}\right),$$

$$N_{vi}(0) = 0, \quad \frac{\partial N_{vi}}{\partial x}(\infty) = 0, \quad i = +, 0$$

расчет формы профиля концентрации А-центров, формирующегося в условиях импульсных облучения и смещений (рис. 2, сплошные кривые), дает наилучшее согласие с экспериментом для значений  $\tau_{v+}$  (расчет), приведенных в последнем столбце таблицы.

Материал	$h$ , мкм	$t_{хар}$ , мкс	$\tau_{v+}/t_{др}$	$\tau_{v+}$ , мкс (оценка)	$\tau_{v+}$ , мкс (расчет)
КЭФ-1	1.56	<3.5	<13	<45	≤35
КЭФ-4.5	3.42	7—15	2.7	19—41	30
КЭФ-7.5	4.34	15—50	1.7	25—85	38

Отметим, что для всех трех слитков полученные величины  $\tau_{v+}$  (расчет) близки и лежат в диапазоне 30—38 мкс, откуда также следует оценка коэффициента диффузии  $D_{v+} = l_V^2/\tau_{v+} = (2 \div 3) \cdot 10^{-5}$  см<sup>2</sup>/с и дрейфовой подвижности  $\mu_{v+} = eD_{v+}/kT = 10^{-3}$  см<sup>2</sup>/В·с положительно заряженных вакансий в кремнии при комнатной температуре. Следует отметить, что величины кинетических коэффициентов определены с точностью до множителя  $\sim 2$  в связи с неопределенностью заряда дрейфующих вакансий ( $V^+$  либо  $V^{2+}$  [6]).

В заключение отметим, что наблюдаемая зависимость времени формирования неоднородного распределения А-центров от параметров ОПЗ (величины поля, размера) подтверждает дрейфовую модель происхождения профилей концентрации дефектов и приводит к следующей оценке времени жизни и кинетических коэффициентов положительно заряженных вакансий в кремнии при комнатной температуре:  $\tau_{v+} = 30$ —38 мкс,  $D_{v+} = (2 \div 3) \cdot 10^{-5}$  см<sup>2</sup>/с,  $\mu_{v+} = 10^{-3}$  см<sup>2</sup>/В·с.

#### Л и т е р а т у р а

- [1] Кучинский П. В., Ломако В. М., Петрунин А. П. — Письма ЖТФ, 1985, т. 11, в. 5, с. 309—311.
- [2] Болотов В. В., Карпов А. В., Стучинский В. А. — ФТП, 1988, т. 22, в. 1, с. 49—55.
- [3] Берман Л. С., Лебедев А. А. Емкостная спектроскопия глубоких центров в полупроводниках. Л., 1981. 174 с.
- [4] Лугаков П. Ф., Лукьяница В. В. — ФТП, 1984, т. 18, в. 2, с. 345—347.
- [5] Lugakov P. F., Lukyanitsa V. V. — Phys. St. Sol. (a), 1984, v. 83, N 2, p. 521—528.
- [6] Бургузи Ж., Ланно М. Точечные дефекты в полупроводниках. Экспериментальные аспекты. М., 1985. 304 с.