

## КОНФИГУРАЦИОННО-БИСТАБИЛЬНЫЕ ДЕФЕКТЫ В КРЕМНИИ

*П.В.Кучинский, В.М.Ломако, Л.Н.Шахлевич*

В кремнии обнаружены дефекты, имеющие две различные структурные конфигурации в изоэлектронном состоянии. Определены свойства дефектов и параметры конфигурационной перестройки.

Среди наиболее интересных дефектов в полупроводниках в настоящее время следует выделить центры, характеризующиеся сильным электрон-решеточным взаимодействием, например,  $U$ -центры – дефекты с отрицательной энергией корреляции<sup>1, 2</sup>.

В данной работе изучались дефекты в кремнии, испытывающие конфигурационные перестройки в одном и том же зарядовом состоянии. Дефекты вводились в  $n$ -кремний ( $n_0 = 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ) облучением  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$ . Определение их параметров проводилось методом нестационарной емкостной спектроскопии, которая позволяет определять концентрацию дефектов в различных энергетических состояниях и энергию термоактивации захвата и эмиссии носителей. В нашем случае в зависимости от условий эксперимента регистрируются два сигнала, соответствующие энергиям термоактивации эмиссии электронов в зону проводимости  $E_A = 0,12 \text{ эВ}$  и (или)  $E_B = 0,18 \div 0,19 \text{ эВ}$ . При коротких длительностях импульсов заполнения ловушек электронами ( $t \leq 10^{-5} \text{ с}$ ) регистрируется  $A$ -сигнал, причем  $B$ -сигнал отсутствует. С увеличением длительности заполняющих импульсов амплитуда  $A$ -сигнала уменьшается, и наблюдается одновременно рост  $B$ -сигнала (рис. 1). При условии, что период следования импульсов много больше, чем постоянная времени термоэмиссии электронов для  $B$ -сигнала, для соотношения между амплитудами  $A$ - и  $B$ -сигналов имеем  $\Delta C_A(t) + \Delta C_B(t) = \text{const}$ .

Последнее позволяет заключить, что энергии термоактивации эмиссии  $E_A$  и  $E_B$  соответствуют не двум различным дефектам, а одному дефекту в двух состояниях. Действительно, при временах заполнения ловушек электронами, много меньших времени их перестройки из  $A$ -состояния в состояние  $B$ , в эксперименте регистрируется только  $A$ -состояние с энергией термоактивации эмиссии  $E_A$ . С увеличением длительности импульсов заполнения электронами дефекты, захватив электрон, переходят в  $B$ -состояние, тем самым уменьшая амплитуду сигнала термоэмиссии, характеризующего  $A$ -состояние. В то же время доля  $B$ -состояний растет и при  $t \gg \tau_{\Pi}$  (где  $\tau_{\Pi}$  — характеристическое время перестройки конфигурации  $A \rightarrow B$ ) регистрируются только дефекты с энергией термоактивации эмиссии  $E_B$ . Концентрация ловушек в состоянии  $B$  (при переходе  $A \rightarrow B$ ) описывается выражением:  $N_B(t) = N_0 [1 - \exp(-t/\tau_{\Pi})]$ , где  $N_0$  — концентрация центров, захвативших электрон, в начальный момент времени.

В свою очередь, время перестройки зависит от температуры и хорошо описывается в рамках модели реакций первого порядка:  $\tau_{\Pi} = \tau_0 \exp(-E_T/kT)$ , где  $E_T = 0,15$  эВ — энергия активации перестройки  $A \rightarrow B$ , а  $\tau_0^{-1} = 2,8 \cdot 10^{12} \text{ c}^{-1}$  — частотный фактор.

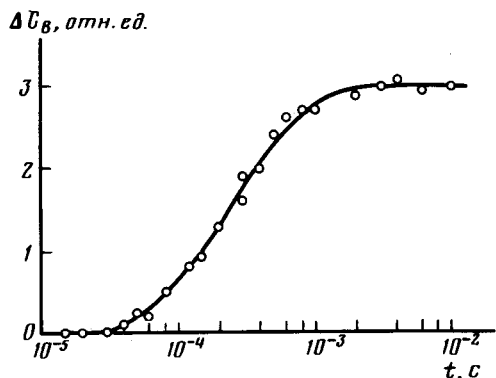


Рис. 1

Рис. 1. Зависимость концентрации Б1-дефекта в состоянии  $B$  от длительности импульсов заполнения

Рис. 2. Конфигурационно-координатные диаграммы для дефекта Б1 ( $E$  — полная энергия,  $Q$  — обобщенная координата)

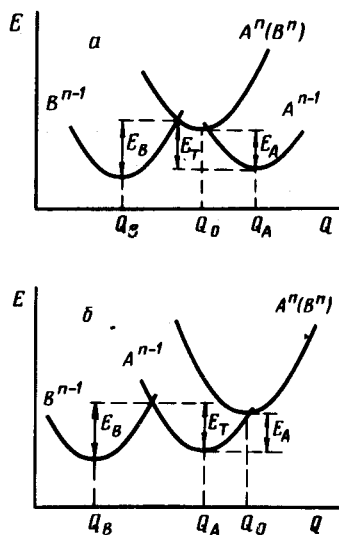


Рис. 2

Наблюдаемые переходы можно описать в рамках двух альтернативных конфигурационно-координатных диаграмм, показанных на рис. 2,  $a, б$ . Незаполненному состоянию центра при наличии свободной пары электрон-дырка соответствует кривая  $A^n(B^n)$ , которая является общей для обоих состояний<sup>3</sup>. В зависимости от температуры образца и времени заполнения центров электронами дефекты переходят в состояние, описываемое кривой  $A^{n-1}$  или  $B^{n-1}$ , соответственно характеризующиеся новым равновесным значением обобщенной координаты  $Q_A$  или  $Q_B$ . При низких температурах и коротких длительностях импульсов заполнения ( $t \leq 10^{-5}$  с) захват электрона переводит систему в состояние  $A^{n-1}$  с равновесным значением  $Q = Q_A$ . Энергии  $E_A$  соответствует термоактивированный переход из состояния  $A^{n-1}$  в  $A^n$ . При этом, переход системы в состояние  $B^{n-1}$  ограничивается барьером  $E_T$ . С ростом температуры и длительности импульсов заполнения вероятность преодоления барьера  $E_T$  возрастает, и дефекты переходят в состояние  $B^{n-1}$  с равновесным значением обобщенной координаты  $Q_B$ . Переход системы из состояния  $B^{n-1}$  в состояние  $B^n(A^n)$  определяется величиной энергии термоэмиссии  $E_B$ . В случае диаграммы, представленной на рис. 2,  $a$ , величина  $E_B = 0,18$  эВ, для рис. 2,  $б$  —  $E_B = 0,19$  эВ. Так как состояние  $B^{n-1}$  при равновесном значении  $Q = Q_B$  характеризуется меньшей, по сравнению с состоянием  $A^{n-1}$  ( $Q = Q_A$ ), величиной полной энергии, конфигурация  $B$  является стабильной, а конфигурация  $A$  — метастабильной. Имеющиеся данные не позволяют отдать предпочтение какой-либо из представленных конфигурационных диаграмм.

Следует отметить, что образование описанных выше центров (Б1) наблюдалось в кремнии с низким содержанием кислорода ( $\leq 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ). В указанных образцах, помимо Б1-дефектов, регистрируются также центры с энергией термоактивации эмиссии 0,18 эВ, для которых не наблюдаются вышерассмотренные процессы перестройки. Не обнаружено перестройки дефектов с такой же энергией термоактивации эмиссии в образцах с высоким содержанием кислорода ( $\approx 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ). Эти факты свидетельствуют о том, что Б1-дефект не может быть связан с А-центром в кремнии. Подтверждением сказанного служат данные по температурной стабильности дефекта Б1, который отжигается в интервале 200 – 250°С, в то время как отжиг А-центра наблюдался нами в этих же образцах при  $T < 300^\circ\text{C}$ .

Таким образом, модель бистабильной конфигурации дефекта объясняет наблюдаемую трансформацию энергетического спектра термоэмиссии электронов и изменения концентрации ловушек Б1 в разных состояниях при исследовании захвата и эмиссии носителей. Определены значения энергии термоэмиссии электронов из состояний А и В в зону проводимости, соответственно как  $E_A = 0,12$  и  $E_B = 0,18 - 0,19$  эВ, и величина барьера, разделяющего эти состояния,  $E_T = 0,15$  эВ. Показано, что дефект Б1 не является кислородосодержащим центром.

#### Литература

1. Harris R.D., Newton J.L., Watkins G.D. Phys. Rev. Lett., 1982, 48, 1271.
2. Baraf G.A., Kane E.O., Schluter M. Phys. Rev. B., 1980, 21, 5662.
3. Levinson M., Stavola M., Besomi P. Phys. Rev. B., 1984, 30, 5817.

НИИ прикладных  
физических проблем им. А.Н.Севченко  
при Белорусском государственном  
университете им. В.И.Львина

Поступила в редакцию  
13 марта 1986 г.