

## КОЛЕБАТЕЛЬНАЯ РЕАКЦИЯ ПЕРЕСТРОЙКИ ДЕФЕКТОВ В КРЕМНИИ

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

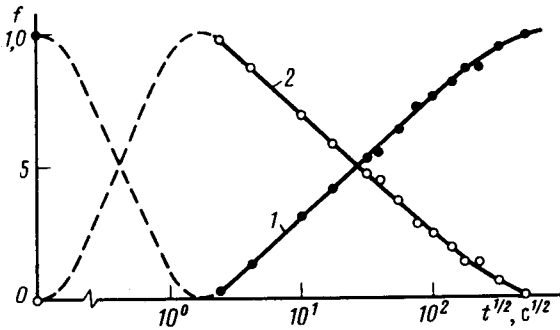
Экспериментально показана возможность существования "колебательной" реакции взаимодействия дефектов в кремнии.

В последнее время интенсивно исследуются колебательные химические реакции, протекающие в жидких растворах <sup>1</sup>. В данной работе при изучении термической перестройки радиационных дефектов в кремнии обнаружены повторяющиеся во времени изменения состояний дефектов, позволяющие отождествить их с колебательной реакцией.

Образцы представляли *p-n*-структуры на основе *n*-кремния ( $n_0 = 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ), полученные диффузией бора в кислородной среде. Дефекты вводились облучением  $\gamma$ -квантами <sup>60</sup>Со. Концентрация дефектов, положение их энергетических уровней и сечение захвата носителей определялись методом нестационарной емкостной спектроскопии.

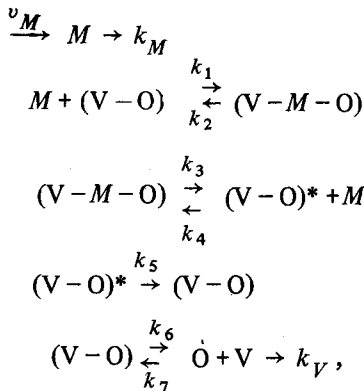
В исследованных образцах, обогащенных кислородом, основным радиационным дефектом является центр *E1* с энергетическим уровнем  $E_c - 0,18 \text{ эВ}$  и сечением захвата для электронов  $\sigma_n = 2 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2$ , который обычно связывается в литературе с *A*-центром (комплекс вакансия – кислород,  $V - O$ ) <sup>2</sup>. Указанный комплекс термически стабилен вплоть до 600 К. Однако, проведенные нами исследования показали, что уже при  $T \gtrsim 373 \text{ К}$  наблюдается уменьшение концентрации указанного центра, сопровождающееся появлением дефектов *E2* с уровнем  $E_c - 0,34 \text{ эВ}$  и сечением захвата носителей  $\sigma_n = 1 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ . Это стимулировало проведение исследований зависимости концентрации указанных дефектов от времени при фиксированной температуре отжига образцов. На рисунке представлены временные зависимости концентрации центров *E1* и *E2* при температуре отжига образца 600 К, нормированные на их суммарную концентрацию для текущего времени отжига  $f = N_{1, 2}(t) / [N_1(t) + N_2(t)]$ . Нормировка выбрана для исключения влияния распада комплексов, который наблюдается при больших временах отжига. Видно, что в течение первых  $\sim (4 \div 5)$  с происходит полное исчезновение дефектов *E1*, сопровождающееся появлением в такой же концентрации дефектов *E2*. В дальнейшем процесс идет в обратном направлении: центры *E2* исчезают, а вместо

них появляются дефекты  $E1$ . Таким образом, концентрация основных радиационных дефектов с уровнем  $E_c - 0,18$  эВ испытывает полный цикл колебаний (появление — исчезновение — появление). Возможность наблюдения дальнейшего поведения системы дефектов во времени при  $t > 10^6$  с ограничена термическим распадом комплекса  $(V-O)$ . Попытки исследования колебательного режима перестройки дефектов при более низкой температуре показали, что время перехода системы дефектов из одного состояния в другое возрастает на несколько порядков, что делает проведение такого эксперимента нереальным.



Зависимость нормированной концентрации дефектов от времени изотермического отжига ( $T=600$  K): 1 —  $E_c - 0,18$  эВ ( $E1$ ); 2 —  $E_c - 0,34$  эВ ( $E2$ )

Из рисунка видно, что время перестройки  $E1 \rightarrow E2$  составляет  $\sim 5$  с, а обратного процесса  $E2 \rightarrow E1 \sim 10^6$  с. Это указывает на существенное возрастание "периода" реакции, обусловленное уменьшением "добротности" системы во времени. Как следует из <sup>3</sup> такая ситуация может реализоваться, если коэффициенты химических реакций непостоянны во времени. В нашем случае наблюдаемое поведение концентраций дефектов во времени может быть описано следующей схемой:



где  $M$  — подвижный при  $T \geq 373$  К дефект, генерируемый со скоростью  $\nu_M$  и уходящий на сток с константой скорости  $k_M$ . Причем, скорости его генерации и ухода на стоки зависят от времени. Захват комплексом  $(V-O)$  подвижной компоненты  $M$  приводит к структурной перестройке центра в состояние  $(V-O)^*$ , дающее уровень в запрещенной зоне  $E_c - 0,34$  эВ. Эта структурная перестройка сопровождается высвобождением компоненты  $M$ . В свою очередь конфигурация  $(V-O)^*$  является метастабильной. Возможность существования центров в нескольких структурных конфигурациях показана в <sup>4-6</sup>. Последнее уравнение описывает термический распад комплекса  $(V-O)$  с уходом вакансий на стоки. Существенным для возникновения колебаний в данной модели, как и в случае <sup>3</sup>, является связывание компоненты  $M$  комплексом  $(V-O)$  с последующим ее высвобождением.

Что же может выступать в роли дефекта  $M$ ? Изучение кинетики перестройки, в предположении реакции первого порядка, позволило определить энергию активации процесса  $E1 \rightarrow E2$ , которая составляет  $\cong 0,7$  эВ. В первом приближении энергию активации трансформации дефекта можно связать с энергией миграции дефекта  $M$ . Сравнение полученного значения для

энергии активации процесса с данными для энергий миграции собственных междоузельных атомов ( $\cong 0,85$  эВ) и атомов углерода ( $\cong 0,80$  эВ) в кремнии ' дает удовлетворительное совпадение. Это позволяет предположить, что в данном случае подвижным дефектом  $M$ , приводящим к колебанию концентрации  $A$ -центров, являются атомы углерода или собственные междоузельные атомы кремния.

### Литература

1. *Гарел Д., Гарел О.* Колебательные химические реакции: пер. с англ. М.: Мир, 1986. с. 148.
2. *Corbett W. et al.* Phys. Rev., 1961, 121, 1015.
3. *Сельков Е.Е., Назаренко В.Г.* Биофизика, 1980, 25, 1006.
4. *Levinson M., Stavola M., Besomi P.* Phys. Rev. B, 1984, 30, 5817.
5. *Бургуэн Ж., Ланно М.* Точечные дефекты в полупроводниках: пер. с англ. М.: Мир, 1985, с. 304.
6. *Кучинский П.В., Ломако В.М., Шахлевич Л.Н.* Письма в ЖЭТФ, 1986, 43, 423.
7. *Емцев В.В., Машовец Т.В.* Примеси и точечные дефекты в полупроводниках, М.: Радио и связь, 1981, с. 248.

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

Поступила в редакцию  
3 октября 1986 г.  
После переработки  
23 февраля 1987 г.