

## Влияние внешнего электрического поля и энергии облучения на эффективность образования пар Френкеля в кристаллах кремния

© З.В. Башелейшвили, Т.А. Пагава

Грузинский технический университет,  
380075 Тбилиси, Грузия

(Получена 30 ноября 1998 г. Принята к печати 18 февраля 1999 г.)

Путем локального облучения *p*-Si и *n*-Si с последующим измерением объемной фотоэдс вдоль образца показано, что энергия кулоновского взаимодействия между разноименно заряженными компонентами пар Френкеля ничтожно мала по сравнению с энергией, переданной атому кремния при облучении *n*-Si электронами с энергией (6÷8) МэВ. Высказано предположение, что при облучении *n*-Si электронами с энергией 8 МэВ каскадный механизм дефектообразования превалирует над диффузионным.

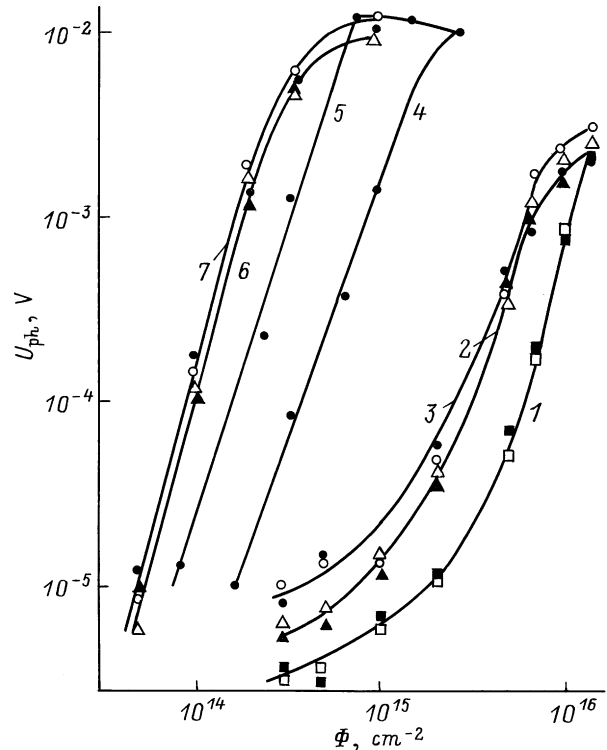
В возникновении, стабилизации и перестройке дефектов определяющую роль играют как первичные акты взаимодействия быстрых частиц (после которых остаются первичные радиационные дефекты — пары Френкеля, избежавшие аннигиляции сразу после своего образования), так и вторичные процессы, когда при взаимодействии мигрирующих компонентов пар Френкеля между собой, а также с примесными атомами или исходными несовершенствами образуются разные электроактивные комплексы или даже области объемного заряда [1–3].

Предположение о том, что образующиеся в процессе облучения в кремнии пары Френкеля — вакансии и межузельные атомы — аннигилируют непосредственно между собой сразу после возникновения в основном за счет сил кулоновского взаимодействия, стало наиболее приемлемым теоретическим предположением [4]. В настоящее время накопилось большое количество работ, которые, основываясь на этом предположении, объясняют разные экспериментальные данные, в том числе, эксперименты, подтверждающие сам факт существования заряженных компонентов пар Френкеля в кремнии (разноименно заряженные в *n*-Si и одноименно — положительно — заряженные в *p*-Si) [5–9].

С целью дальнейшего изучения свойств первичных радиационных дефектов, в частности для определения зарядового состояния собственного межузельного атома и вакансии в кристаллах кремния, а также нахождения зависимости явления аннигиляции компонентов пар Френкеля от энергии налетающих электронов и приложенного внешнего электрического поля в процессе облучения, мы в своей работе использовали метод локального облучения с последующим измерением объемно-градиентной фотоэдс  $U_{ph}$  вдоль образца. Впервые этот метод был применен в работе [5].

Для проведения экспериментов использовали образцы монокристаллического кремния марки БКД-500 и БКЭФ-150 с концентрацией дырок и электронов соответственно  $\sim 5 \cdot 10^{13}$  и  $\sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$ , полученные методом бестигельной зонной плавки. Образцы облучались электронами с энергией 2, 6 и 8 МэВ при комнатной температуре. Плотность потока электронов во всех экспериментах была одинакова и равнялась  $\varphi = 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ .

На рисунке представлены кривые, описывающие процесс возрастания величины фотоэдс  $U_{ph}$  от дозы облучения для разных энергий налетающих электронов в кремнии *n*- и *p*-типов. Как видно из рисунка (кривые 1–3), внешнее электрическое поле, приложенное к образцу *p*-Si, во время облучения не изменяет величину объемной фотоэдс. Кривые  $U_{ph} = f(\Phi)$  для образцов, облученных в присутствии внешнего электрического поля ( $E = 110 \text{ В/см}$ ) и в его отсутствие ( $E = 0$ ), накладываются друг на друга при данной



Зависимость объемной фотоэдс  $U_{ph}$  от дозы облучения  $\Phi$  в образцах *p*-Si (1–3) и *n*-Si (4–7), облученных при  $T_{irr} = 300 \text{ К}$  электронами с энергиями  $E_{irr}$ , МэВ: 1, 4, 5 — 2.2; 2, 6 — 6; 3, 7 — 8. Все измерения  $U_{ph}(\Phi)$  выполнены при электрических полях  $E = 0$  и  $110 \text{ В/см}$  и не обнаружено зависимости  $U_{ph}(E)$ . 4, 5 — зависимости  $U_{ph}(\Phi)$  для *n*-Si при  $E_{irr} = 2.2 \text{ МэВ}$  из работы [5], измеренные при поле  $E$ , В/см: 4 — 0, 5 — 110.

энергии облучения электронами. В образцах  $n$ -типа (рисунк, кривые 6, 7), облученных электронами с энергией 6 и 8 МэВ, наблюдается аналогичная ситуация, как и для кремния  $p$ -типа, т.е. влияние внешнего электрического поля на зависимость  $U_{ph} = f(\Phi)$  отсутствует, тогда как в работе [5] показано, что приложение электрического поля с определенным напряжением к образцу во время облучения электронами с энергией 2.2 МэВ сдвигает положение зависимости  $U_{ph} = f(\Phi)$  в область меньших доз (рисунок, кривые 4, 5).

Как известно, величина объемной фотоэдс прямо пропорциональна градиенту удельного сопротивления и времени жизни неосновных носителей тока  $\tau$ , но величина  $U_{ph}$  в основном определяется градиентом удельного сопротивления, так как  $\tau$  — слабо изменяющаяся функция от дозы облучения  $\Phi$  [10]. Следовательно, возрастание величины  $U_{ph}$  связано с увеличением градиента удельного сопротивления, а она в свою очередь растёт с уменьшением концентрации свободных носителей тока в облученной части образца в результате образования вторичных радиационных дефектов. Исходя из этих соображений и общепринятого взгляда о возникновении первичных радиационных дефектов, полученные экспериментальные данные можно объяснить так: в процессе облучения кремния быстрыми электронами разных энергий создаются первичные дефекты — пары Френкеля — с разными расстояниями между их компонентами в зависимости от того, насколько превосходит передаваемая атому энергия (при упругом соударении с налетающими частицами) над пороговой энергией образования первичных дефектов. При этом, как отмечалось в работе [4], сразу после образования пар Френкеля их компоненты в кристаллах кремния  $p$ -типа заряжены положительно, а в кремнии  $n$ -типа имеют противоположные заряды — вакансия заряжена отрицательно, а межузельный атом — положительно.

Если, энергия налетающих электронов  $\sim 2$  МэВ, то вероятность образования близких пар Френкеля больше, чем вероятность образования свободных вакансий и межузельных атомов, т.е. разделенных пар Френкеля.

Дальнейшая судьба близких пар Френкеля — спонтанная рекомбинация, диссоциация на свободные вакансии и межузельные атомы или существование в виде метастабильных пар — зависит от зарядового состояния компонентов пар Френкеля и от условий эксперимента, в частности от внешнего электрического поля, приложенного к образцу во время облучения [5].

В кремнии  $p$ -типа при любых энергиях, использованных в нашем эксперименте, внешнее электрическое поле не влияет на эффективность введения вторичных радиационных дефектов ( $U_{ph}$  не изменяется в зависимости от величины внешнего электрического поля, приложенного к образцам в процессе облучения). Для энергии порядка  $\sim 2$  МэВ это явление может иметь место в том случае, если вакансии и межузельные атомы заряжены положительно после их возникновения. Как известно [3], стабильными зарядовыми состояниями в кремнии  $p$ -типа

являются дефекты  $V^{++}$  и  $V^0$ , которые возникают от нестабильной вакансии  $V^+$ . Тогда на основе полученных данных можно предположить, что и межузельный атом заряжен положительно, и близкая пара Френкеля распадается на компоненты сразу после возникновения. Поэтому нам представляется логичным тот факт, что в условиях облучения быстрыми электронами в кремнии  $p$ -типа пары Френкеля разделяются уже при весьма низких температурах и собственные межузельные атомы и вакансии взаимодействуют с примесями [6].

Для энергии облучения  $6 \div 8$  МэВ присутствие или отсутствие внешнего электрического поля в процессе облучения, приложенного к образцу, не изменяет величину  $U_{ph}$  как в  $p$ -, так и в  $n$ -типах кремния. Это можно объяснить тем, что при облучении кристаллов кремния электронами с энергией  $6 \div 8$  МэВ расстояние между компонентами пар Френкеля велико и, несмотря на то что в кристаллах кремния  $n$ -типа они заряжены разноименно, кулоновские силы взаимодействия между ними непосредственно после возникновения незначительны. Вакансии и межузельные атомы с большей вероятностью взаимодействуют с примесными атомами, чем аннигилируют между собой непосредственно после возникновения, а если аннигилируют, то через аннигиляционные центры [2]. Можно заметить, что при одинаковых дозах облучения электронами с энергией  $6 \div 8$  МэВ величина  $U_{ph}$  на порядок больше, чем при энергиях  $\sim 2$  МэВ. Следовательно, зависимость  $U_{ph} = f(\Phi)$  для обоих типов кремния смещается в сторону меньших доз облучения.

Известно, что энергия электронов  $E_{ит} = 9$  МэВ является пороговой, выше которой в кремнии могут возникать области разупорядочения [11]. Следовательно, можно ожидать, что при облучении кристаллов кремния электронами с энергией 8 МэВ над диффузионным механизмом превалирует каскадный механизм дефектообразования, чем и объясняется наблюдаемый эффект смещения кривых зависимостей  $U_{ph} = f(\Phi)$  в сторону меньших доз с увеличением энергии облучения.

## Список литературы

- [1] В.С. Вавилов. *Действие излучения на полупроводники* (М., Наука, 1963).
- [2] *Физические процессы в облученных полупроводниках*, под ред. проф. Л.С. Смирнова (Новосибирск, 1977).
- [3] В.В. Емцев, Т.В. Машовец. *Примеси и точечные дефекты в полупроводниках* (М., Наука, 1981).
- [4] J.W. Corbett. *Radiation Effect in Semiconductors* (1976) p. 1.
- [5] Л.С. Милевский, В.С. Гарнык. ФТП, **13**(7), 1369 (1979).
- [6] В.В. Емцев, Т.В. Машовец, Е.Х. Назарян. ФТП, **16**(4), 687 (1982).
- [7] З.В. Башелейшвили, Т.Л. Бжалава, Т.А. Пагава, В.В. Санадзе. Сообщения АН ГССР, **116** (2), 297 (1984).
- [8] П.Ф. Лугаков, В.В. Лукьяница. ФТП, **18** (2), 345 (1984).
- [9] П.Ф. Лугаков, В.В. Лукьяница. Электрон. техн., сер. 6, № 2, 38 (1982).

- [10] З.В. Башелейшвили, В.С. Гарнык, В.С. Горин, Т.А. Пагава. ФТП, **18**, (9), 1714 (1984).
- [11] Г.М. Иванов, Н.Н. Сирота. *Радиационные дефекты в полупроводниках* (Минск, 1972) с. 56.

*Редактор Т.А. Полянская*

**The influence of external electric field and the energy of irradiation on the effectiveness of Frenkel pair formation in silicon crystals**

Z.V. Basheleishvili, T.A. Pagava

Georgian Technical University,  
380075 Tbilisi, Georgia