

06

## Восстановление времени жизни носителей заряда под воздействием ультразвуковой обработки в $\gamma$ -облученном кремнии

© А.А. Подолян, А.Б. Надточий, О.А. Коротченков

Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко, Украина

E-mail: gogj@univ.kiev.ua

Поступило в Редакцию 31 октября 2011 г.

Показано, что ультразвуковая обработка  $\gamma$ -облученного кремния способна существенно восстановить время жизни неосновных носителей заряда, уменьшенное облучением. Достигнутая степень восстановления составляет порядка 70%. Предложен механизм эффекта восстановления, связанный с освобождением вакансий из  $E$ -центров и их последующим захватом на дефектные стоки. Предполагается, что такими стоками могут быть микродефекты А-типа.

Исследования радиационных повреждений в кремнии привлекают значительное внимание на протяжении последних десятилетий вследствие все возрастающего использования Si-детекторов как в экспериментальной физике высоких энергий, так и в широком спектре промышленных, медицинских, космических и военных приборов [1–3]. В частности, такие исследования стимулируются широкомасштабным использованием Si микрополосковых и пиксельных детекторов для обеспечения прецизионного трекинга заряженных частиц в экспериментах на Большом адронном коллайдере в ЦЕРНе [4].

Кремниевые детекторы в большинстве случаев изготавливают из высокоомного ( $\rho = 1–6 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ ), легированного фосфором материала  $n$ -типа, выращенного методом зонной плавки ( $FZ$ ) [3,5]. Благодаря высокому сопротивлению  $FZ$ -Si режим обеднения в детекторе достигается при относительно малых рабочих напряжениях. Наоборот, удельное сопротивление Si, выращенного методом Чохральского ( $Cz$ ), оказывается гораздо меньшим. Как следствие, рабочие напряжения, необходимые для достижения полного обеднения, настолько велики, что могут превышать напряжение пробоя, не позволяя достичь до-

статочного для эффективного собирания заряда смещения. Следует, однако, отметить, что методика выращивания  $Cz$ -Si непрерывно совершенствуется, предоставляя высококачественный радиационно-стойкий материал, пригодный для изготовления детекторов [6].

Общей проблемой эксплуатации детекторов является деградация их рабочих характеристик при облучении, в частности падение времени жизни носителей. Одним из традиционных методов восстановления характеристик является тепловая обработка облученного Si, способная существенно подавить нежелательные радиационные дефекты [7,8]. Однако высокотемпературный отжиг способствует генерации термически индуцированных дефектов, в свою очередь негативно влияющих на рабочие характеристики устройств.

Перспективной в этой связи является ультразвуковая обработка (УЗО) облученного Si, позволяющая влиять на концентрацию дефектов при умеренном сопутствующем разогреве образца, не превышающем 80–100°C. Так, с использованием УЗО были обнаружены эффекты перестройки дефектов и их комплексов [9], увеличения диффузии дефектов [10]. В облученном Si было достигнуто восстановление электропроводности [11], преобразование дефектов [12], отжиг времени жизни [13], однако детальный механизм УЗО не был описан. Сообщалось также о влиянии УЗО на вольт-амперные характеристики Si-структур и солнечных элементов [14,15].

Данная работа предлагает механизм эффекта подавления радиационных дефектов и восстановления времени жизни в  $FZ$ -Si при УЗО. Данные могут найти применение при разработке интегрального детекторного устройства, включающего Si-детектор и пьезоэлектрическую подложку, обеспечивающую УЗО в процессе эксплуатации детектора и увеличивающую срок его службы.

Исследовались объемные образцы (111)  $FZ$ -Si  $n$ -типа с остаточной концентрацией атомов бора  $\sim 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  и концентрациями легирующей примеси фосфора в пределах от  $2 \cdot 10^{12}$  до  $4.5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ . Образцы облучались интегральными дозами  $\gamma$ -квантов  $^{60}\text{Co}$  от  $5 \cdot 10^6$  до  $2 \cdot 10^7 \text{ rad}$  и травились в полирующем травителе состава  $3\text{HNO}_3 : 1\text{HF} : 1\text{CH}_3\text{COOH}$ . Изохронный тепловой отжиг (ТО) проводился в диапазоне температур от 100 до 250°C по описанной ранее методике [16]. Для определения распределения микродефектов использовались методики сканирования поверхностного распределения времени жизни [17] и селективного химического травления дефектов [18]. Представленные ниже данные

преимущественно получены на облученных образцах свирлевой картиной распределения микродефектов. Ямки травления выявили наличие дислокационных петель размером от 5 до 10 nm в диаметре, соответствующих микродефектам А-типа.

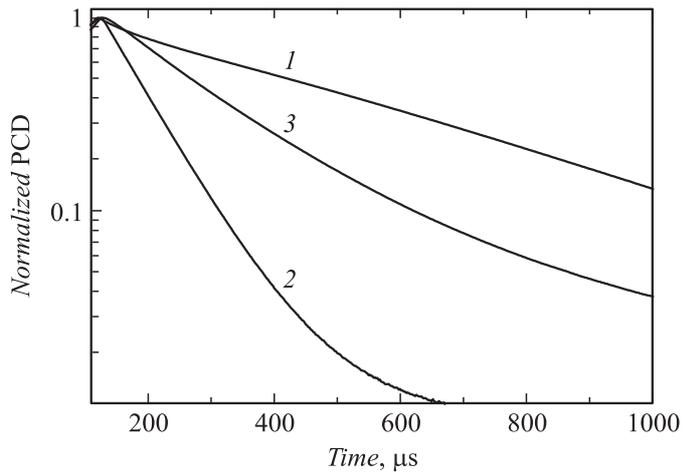
Время жизни определялось методом затухания фотопроводимости (ФП) при низком уровне инжекции ( $\Delta\sigma/\sigma < 0.01$ ) [19] с использованием омических GaZn контактов. Для наблюдения ФП использовался светодиод с длиной волны излучения  $1.06 \mu\text{m}$  и длительностью импульса  $100 \mu\text{s}$  и быстродействующий АЦП. DLTS-измерения проводились стандартным методом [20] с созданием барьера Шоттки на рабочей поверхности образца вакуумным напылением Au.

Для возбуждения ультразвука образец в форме прямоугольного параллелепипеда с типичными размерами около  $3 \times 6 \times 10 \text{ mm}$  приклеивался на пьезокерамический преобразователь с резонансной частотой 3.3 МГц. Амплитуда механических напряжений в образце, рассчитанная методом конечных элементов по ранее описанной методике [21], составила  $\sim 10^{-4}$  в максимуме, чему соответствует амплитуда смещения  $\sim 4 \cdot 10^{-8} \text{ m}$  в максимуме. Температура образца контролировалась термопарой Cu–Co.

Типичные кривые затухания ФП приведены на рис. 1. Проявление на них долговременной компоненты свидетельствует о наличии уровней прилипания в образце. Однако, поскольку ее вклад в амплитуду сигнала ФП составляет лишь 2%, рекомбинационное время жизни надежно определяется из линейного участка кривых, изображенных в полулогарифмическом масштабе. Определяемое таким образом время  $\tau_f$  является эффективным временем жизни, которое пересчитывалось в объемное время жизни  $\tau_b$  по методике работы [19].

Облучение приводит к резкому уменьшению  $\tau_b$  и соответственно к убыстрению кинетики затухания ФП (кривая 2 на рис. 1). Наоборот, УЗО увеличивает время затухания ФП (кривая 3), демонстрируя увеличение  $\tau_b$  и свидетельствует о холодном ультразвуковом отжиге (УО) радиационных дефектов. Отжиг времени жизни  $\tau_b$  можно охарактеризовать функцией  $f = (\tau_{ba}^{-1} - \tau_{b0}^{-1}) / (\tau_{birr}^{-1} - \tau_{b0}^{-1})$ , где  $\tau_{b0}$  и  $\tau_{birr}$  — времена жизни до и после  $\gamma$ -облучения, а  $\tau_{ba}$  — после УО (или ТО), определяемые из кривых 1–3 на рис. 1. Данные, полученные при ультразвуковой и тепловой обработках, представлены на рис. 2.

Характер ТО можно объяснить вкладом по меньшей мере двух типов дефектов, отжигающихся при  $\approx 150^\circ\text{C}$  и  $225^\circ\text{C}$  (1 на рис. 2, а).

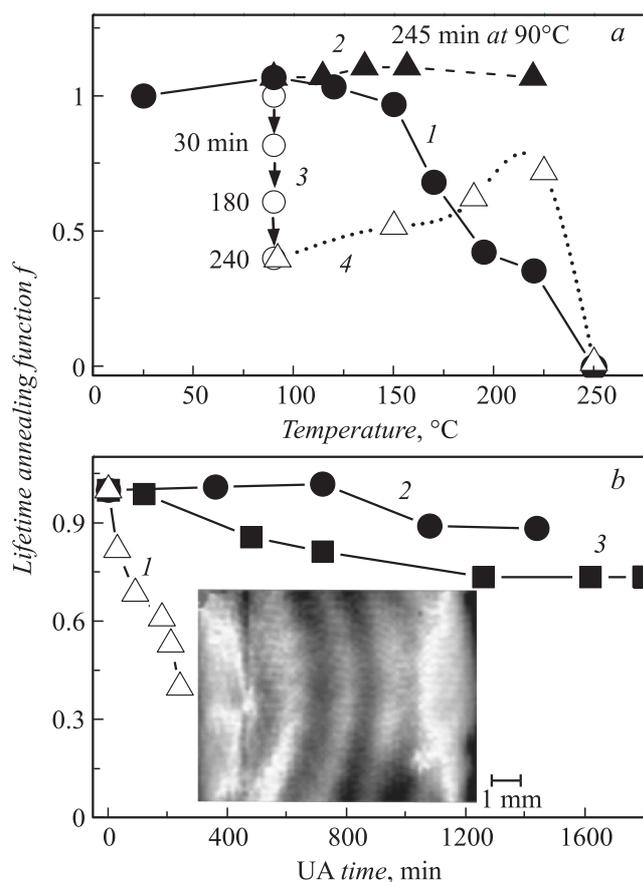


**Рис. 1.** Кривые затухания ФП в образце Si до (1), после (2)  $\gamma$ -облучения и после ультразвуковой обработки (3). Начальные части кривых — экспоненты с постоянными времени  $\tau_f$ .

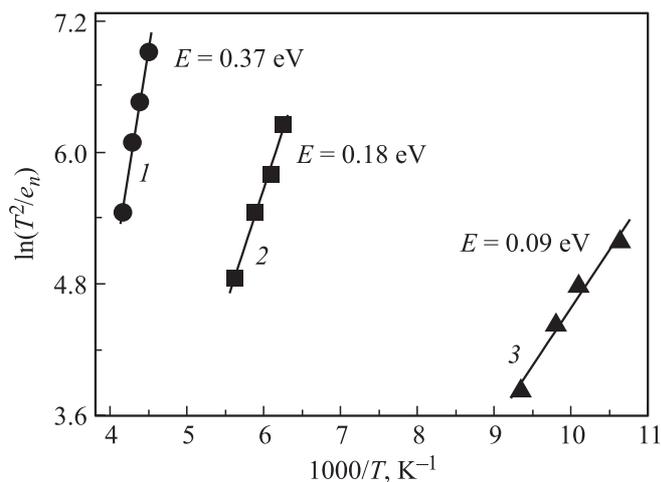
Первый этап восстановления  $\tau_b$  при  $\approx 150^\circ\text{C}$  коррелирует с отжигом  $E$ -центров (комплекс вакансии — атом фосфора,  $V-P$ ), в то время как последующий этап при  $\approx 225^\circ\text{C}$  можно связать с отжигом дивакансии  $V_2$  [22].

Отметим, что УО происходит при относительно низкой температуре образца  $\approx 90^\circ\text{C}$ , определяемой интенсивностью ультразвука, и уменьшение  $f$  зависит от длительности УЗО (3 на рис. 2, *a*). Наоборот, попытка длительного ТО при  $90^\circ\text{C}$  не оказывает существенного влияния на  $f$  (2 на рис. 2, *a*). Подчеркнем, что изохронный ТО, проводимый на образце, прошедшем УО (4 на рис. 2, *a*), демонстрирует дополнительные особенности отжига (увеличение  $f$  в области  $\approx 150-225^\circ\text{C}$ ) и позволяет утверждать, что УО не является чисто термическим процессом.

Величина УО наибольшая в FZ-SI со свирлевой структурой (кривая 1 на рис. 2, *b*). В случае, когда образование свирлевой структуры микродефектов подавлено ростовыми дислокациями, величина УО существенно меньше (кривая 2). Образцы с наименьшей концентрацией протяженных дефектов обнаруживают промежуточную степень УО



**Рис. 2.** Функция  $f$  в зависимости от: *a* — температуры 15-минутного изохронного ТО (точки 1), длительного ТО при 90°C (точки 2) и для УО с возрастанием времени УЗО (точки 3) в образце Si ( $\rho = 4 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ ), ТО после предварительно проведенного УО (точки 4). *b* — времени УЗО для различных образцов Si, обнаруживающих: свирлевую структуру в поверхностном распределении  $\tau_{b0}$ , представленную на вставке ( $\rho = 4 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ ) (точки 1); ростовые дислокации с плотностью  $\approx 10^5 \text{ cm}^{-2}$  ( $\rho = 120 \Omega \cdot \text{cm}$ ) (точки 2); совершенную структуру поверхности с отсутствующими свирлями и дислокациями ( $\rho = 800 \Omega \cdot \text{cm}$ ) (точки 3); светлые области на вставке соответствуют повышенным (до 8%) значениям  $\tau_{b0}$ .



**Рис. 3.**  $T^2$ -корректированные коэффициенты тепловой эмиссии для 3 типов центров, обнаруживаемых в образцах Si методом DLTS. Глубина залегания дефектов определялась из наклона соответствующих прямых.

(кривая 3). Следовательно, можно предположить, что микродефекты являются стоками для дефектов, высвобождаемых при УО, обеспечивая максимальный эффект на кривой 1.

Ранее показано, что при УЗО возможно надбарьерное смещение дефектов [9,21]. Следовательно, подобно ТО, исчезновение  $E$ -центров в процессе УО может определяться двумя процессами, включающими диссоциацию комплексов  $V-P$  в поле механических напряжений и диффузию освобожденной вакансии  $V$  к стокам. Однако, в отличие от ТО, УО сопровождается заметным возрастанием концентрации  $V_2$ , подтверждаемым ростом  $f$  в температурном интервале термоотжига  $V_2$  (4 на рис. 2, а).

Учитывая стоячий характер ультразвуковой волны, высвобождение вакансии из комплекса  $V-P$  происходит лишь в областях пучностей деформаций с последующим выталкиванием  $V$  в область узлов деформаций. Как следствие, восстановление  $\tau_b$  ультразвуком от ухудшенного облучением значения не превышало 70% ( $f \approx 0.3$  для кривой 3 на рис. 2, а). В окрестности микродефекта вакансии захватываются элек-

трически неактивными комплексами. При последующей ТО вакансии преобразуются в активные комплексы  $V_2$ , обеспечивая рост  $f$  на кривой 4 (рис. 2, а).

Зависимости Аррениуса для пиков DLTS представлены на рис. 3. В облученном образце наблюдается уровень с глубиной залегания  $E = 0.37 \pm 0.02$  eV, соответствующий  $E$ -центру [23] (1 на рис. 3). При комбинированной УО и последующей ТО наблюдается  $E = (0.18 \pm 0.01)$  eV (2 на рис. 3), который можно связать с комплексом  $V-O$  ( $A$ -центр) [23]. Данный факт объясним, поскольку дообразуемые в окрестности микродефектов комплексы  $V_2$  при последующем ТО разваливаются с захватом высвободившихся вакансий атомами О, входящими в состав примесной атмосферы микродефектов, с образованием более термически стойких  $A$ -центров. При этом  $A$ -центры не влияют на рекомбинацию неравновесных носителей заряда, поскольку уровень Ферми лежит гораздо ниже уровня  $A$ -центров. В образце, который после облучения подвергался лишь ТО, наблюдается энергетический уровень на  $0.09 \pm 0.01$  eV (3 на рис. 3), ранее регистрировавшийся в облученном  $FZ-Si$  [24], но надежно не идентифицированный. В частности, его связывают с термодонорами в кремнии [25], которые, возможно, образуются в исследованных образцах.

Таким образом, восстановление рекомбинационного времени жизни в поврежденном облучением Si при УЗО можно связать с освобождением вакансий из  $E$ -центров и их последующим захватом на стоки, открывая перспективы продления работоспособности Si детекторов и устройств, используемых при повышенном уровне радиации.

Авторы выражают признательность сотруднику Института ядерных исследований НАН Украины Владимиру Ильичу Хивричу за помощь, оказанную при проведении облучения исследуемых образцов кремния.

## Список литературы

- [1] Bruzzi M. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2001. V. 48. N 4. P. 960–971.
- [2] Yamamoto Y., Kawasaki O., Matsuda S., Morita Y. // Proceedings of the European Space Power Conference. Poitiers, France, 4–8 Sept. 1995. ESA SP-369, 1995. P. 573–578.
- [3] Lindstrum G., Moll M., Fretwurst E. // Nucl. Instrum. Meth. A. 1999. V. 426. N 1. P. 1–15.

- [4] <http://rd50.web.cern.ch/rd50/>.
- [5] *Sadrozinski H.F.-W.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2001. V. 48. N 4. P. 933–940.
- [6] *Bruzzi M., Bisello D., Borrello L., Borchi E.* et al. // Nucl. Instrum. Meth. A. 2005. V. 552. N 1–2. P. 20–26.
- [7] *Maekava T., Inoue S., Aiura A., Usami A.* // Semicond. Sci. Technol. 1986. V. 1. N 5. P. 305–312.
- [8] *Londos C.A., Potsidi M.S., Misiuk A., Ratajczak J., Emtsev V.V., Antonaras G.* // J. Appl. Phys. 2003. V. 94. N 7. P. 4363–4367.
- [9] *Ostapenko S., Korsunskaya N.E., Sheinkman M.K.* // Solid State Phenom. 2002. V. 85–86. P. 317–336.
- [10] *Krevchik V.D., Muminov R.A., Yafasov A.Ya.* // Phys. Stat. Sol. (a). 1981. V. 63. N 2. P. K159–K162.
- [11] *Ostrovskii I.V., Korotchenkov O.A.* // ЖТФ. 1986. Т. 56. В. 11. С. 2283–2284.
- [12] *Олих Я.М., Тумочко Н.Д., Долголенко А.П.* // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 13. С. 67–73.
- [13] *Подольян А.А., Хиврич В.И.* // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. В. 10. С. 11–16.
- [14] *Гусейнов Н.А., Олих Я.М., Аскеров Ш.Г.* // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. В. 1. С. 38–44.
- [15] *Gorb A.M., Olikh O.Ya., Podolian A.O., Korotchenkov O.A.* // IEEE Trans. Nuclear Sci. 2010. V. 57. N 3. P. 1632–1639.
- [16] *Semenyuk A.K., Khivrich V.I., Konozenko I.D.* // Phys. Stat. Sol. (a). 1971. V. 7. N 1. P. 51–59.
- [17] *Podolian A., Nadtochiy A., Kuryliuk V., Korotchenkov O., Schmid J., Drapalik M., Schlosser V.* // Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 2011. V. 95. N 2. P. 765–772.
- [18] *Secco D'aragona F.* // Phys. Stat. Sol. (a). 1971. V. 7. N 2. P. 577–582.
- [19] *Schroder D.K.* Semiconductor Material and Device Characterization. 2nd ed. Wiley-Interscience, 1998. 760 p.
- [20] *Misrachi S., Peaker A.R., Hamilton B.* // J. Phys. E: Sci. Instrum. 1980. V. 13. N 10. P. 1055–1061.
- [21] *Podolian A., Kuryliuk V., Korotchenkov O.* // Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 2009. V. 93. N 11. P. 1946–1951.
- [22] *Stein H.J.* // Radiation Effects in Semiconductors / Ed. by J.W. Corbett and G.D. Watkins. New York: Gordon and Breach, 1971. P. 125.
- [23] *Auret F.D., Deenapanray P.N.K.* // Critical Rev. Sol. State Mater. Sci. 2004. V. 29. N 1. P. 1–4.
- [24] *Brotherton S.D., Bradley* // J. Appl. Phys. 1982. V. 53. N 8. P. 5720–5732.