

05;08

## Влияние ультразвука на отжиг радиационных дефектов в кремнии при комнатных температурах

© А.А. Подолян, В.И. Хиврич

Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко  
Институт ядерных исследований НАН Украины  
E-mail: gogj@mail.univ.kiev.ua

Поступило в Редакцию 23 ноября 2004 г.

Впервые показана возможность ультразвукового отжига при комнатных температурах точечных радиационных дефектов, вводимых в объем монокристаллического кремния  $\gamma$ -облучением  $^{60}\text{Co}$ . Предложена качественная модель процессов, происходящих в системе радиационных дефектов под действием ультразвука.

В последнее десятилетие наметилось направление исследований, в котором ультразвук используется как инструмент, позволяющий эффективно влиять на дефектный состав полупроводниковых материалов [1-4]. Этот вопрос особенно актуален для кремниевой микроэлектроники, поскольку достигаемые на сегодняшний день степени интеграции требуют возможности направленного изменения дефектного состава используемого материала. Более ранними нашими исследованиями на монокристаллическом кремнии была показана возможность стимулированного ультразвуком перераспределения примесей [3] и перестройки дефектной структуры монокристаллического бездислокационного кремния, включающей межузельные атомы кремния [4]. В данной работе нами впервые продемонстрирована возможность низкотемпературного ультразвукового отжига точечных дефектов, введенных в монокристаллический кремний  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$ .

Исследования проводились на монокристаллах *n*-типа тянутого (полученного методом Чохральского) кремния с  $\rho \approx 400 \Omega \cdot \text{cm}$ . Образцы вырезали из центральной части слитка, шлифовали на абразивных порошках карбида кремния (M40, M10) и химически полировали

в СР-4. Размеры образцов после подготовительных обработок составляли  $25 \times 7 \times 1.44$  mm.

Облучение образцов производили  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  ( $T_{irr} < 50^\circ\text{C}$ ) до дозы  $5 \cdot 10^7$  rad ( $\Phi \approx 8 \cdot 10^{16}$  cm $^{-2}$ ).

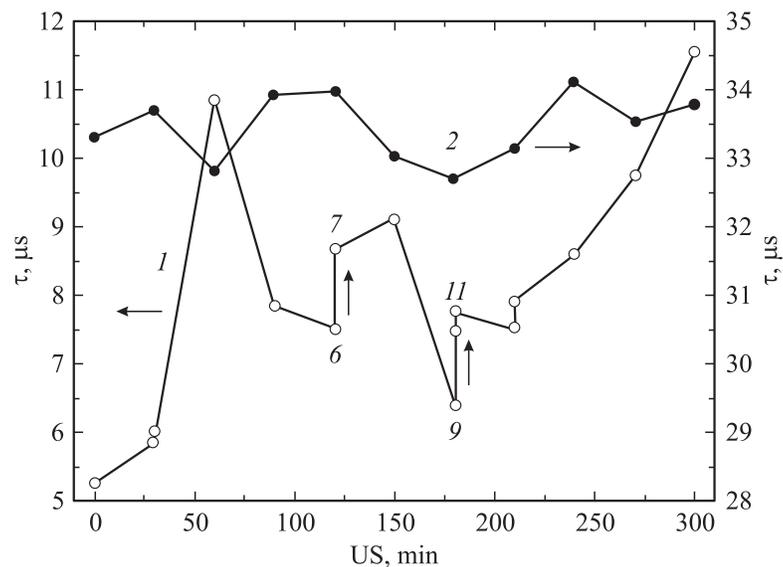
В качестве величины, чувствительной к концентрации радиационных дефектов, в работе измерялось время жизни  $\tau$  неосновных носителей заряда (ННЗ) методом затухания фотопроводимости [5]. Следует подчеркнуть, что во всех исследуемых образцах исходные значения  $\tau$ , измеренные после изготовления образцов, были приблизительно одинаковыми.

Для проведения ультразвуковых обработок (УЗО) использовались пьезокерамические преобразователи в виде колец, в которых возбуждались радиальные моды колебаний. Используемая нами склейка пьезопреобразователя и исследуемого образца позволяла возбуждать в нем ультразвуковые колебания в направлении, соответствующем наибольшему размеру образца на частотах 10–30 kHz.

Все УЗО и измерения  $\tau$  проводили при комнатных температурах.

На рис. 1 представлены зависимости времени жизни ННЗ  $\tau$  в облученном (кривая 1) и необлученном (кривая 2) образцах кремния от продолжительности действия УЗО. Как видно из полученных результатов, УЗО используемых нами мощностей эффективно влияет на  $\tau$  в облученном кремнии. Подобное поведение времени жизни ННЗ в облученном образце объясняется влиянием УЗО на концентрацию радиационных центров рекомбинации (РЦР), введенных облучением.

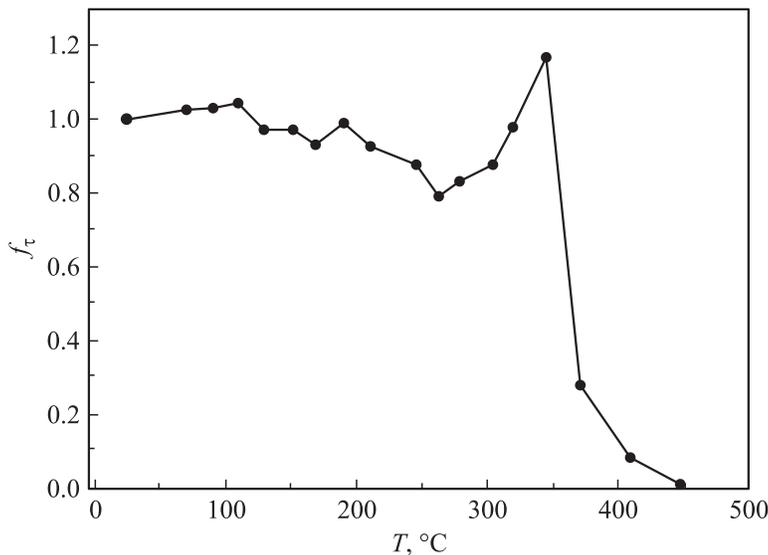
На рис. 2 представлены результаты изохронного (15 min) отжига облученного образца, который не подвергался дополнительным обработкам. Функция  $f_\tau = (1/\tau - 1/\tau_0)/(1/\tau_\Phi - 1/\tau_0)$  представляет собой приведенную к единице долю неотожженных дефектов радиационного происхождения ( $\tau_0$ ,  $\tau_\Phi$  и  $\tau$  — время жизни ННЗ до, после облучения и на различных этапах обработки соответственно). Следует отметить, поскольку остаточный отжиг РЦР происходит в диапазоне температур  $370 \div 450^\circ\text{C}$ , влияние А-центров (комплексов вакансия–междоузельный кислород V–O $_i$ ,  $E_c - 0.17$  eV), являющихся основными рекомбинационными центрами в тянутом *n*-типа кремнии [6,8], на процессы рекомбинации ННЗ в исследуемых образцах весьма незначительно, так как А-центры полностью отжигаются при температурах  $\sim 350^\circ\text{C}$  [6,7]. Схожесть представленной на рис. 2 кривой изохронного отжига и наблюдавшихся ранее авторами работ [9,10]



**Рис. 1.** Зависимость времени жизни ННЗ  $\tau$  в облученном (1) и необлученном (2) кремнии от длительности УЗО.

позволяет нам предположить, что основными РЦР будут комплексы  $C-O-V_2$  (углерод–кислород–дивакансия), вносящие в запрещенную зону акцепторный уровень  $E_c - 0.45$  eV [9,10]. Наблюдаемый незначительный отрицательный отжиг в диапазоне температур  $260-350^\circ C$  может быть следствием дообразования комплексов  $C-O-V_2$  [9,10], происходящего путем взаимодействия вакансий, освобождающихся в результате развала нестабильных при данной температуре А-центров, с комплексами  $C_iO_i$  (междоузельный углерод — междоузельный кислород), которые также образуются в заметных количествах при облучении тянутого кремния [8].

Сложный вид зависимости времени жизни ННЗ  $\tau$  от времени действия УЗО (рис. 1, кривая 1), сводящийся в итоге к возрастанию  $\tau$ , свидетельствует о сложных процессах, происходящих в атмосфере радиационных дефектов под действием УЗО. Как известно, отжигу радиационных дефектов может соответствовать несколько механизмов:



**Рис. 2.** Изохронный отжиг  $\tau$  в облученном образце.

а) миграция дефектов на стоки; б) образование более сложного дефекта; в) диссоциация комплекса [11]. Под действием УЗО, по-видимому, имеют место несколько механизмов отжига РЦР. Так, на первом этапе УЗО (0–60 min) происходит быстрое уменьшение концентрации РЦР, характеризуемое увеличением  $\tau$ . На этом этапе РЦР скорее всего отжигаются путем диффузии на стоки без их последующей диссоциации и становятся при этом рекомбинационно-неактивными. При дальнейшем действии УЗО (60–210 min) наблюдается образование новых рекомбинационных центров, а также незначительный их отжиг, о чем можно судить по поведению  $\tau$  на данном этапе. Кроме того, выдержка образца в течение нескольких суток при  $\sim 25^\circ\text{C}$  сопровождалась отжигом вновь образуемых рекомбинационных центров (см., например, возрастание  $\tau$  — точки 6–7, 9–11 на кривой 1, рис. 1). Такое поведение может быть объяснено стимулированной ультразвуком диссоциацией одних дефектов с последующим образованием других. Действительно, результатом диссоциации комплексов  $\text{C-O-V}_2$  могут

быть новые рекомбинационно-активные дефекты типа А-центров и комплексов, нестабильных при комнатных температурах (возможно, комплексов вакансия–бор замещения  $VB$ ,  $E_v + 0.43$  eV [6,7]), которые приводят к уменьшению  $\tau$  и объясняют наблюдаемый при комнатных температурах отжиг, т.е. увеличение  $\tau$ . И, наконец, на последнем этапе УЗО (210–300 min) вновь наблюдается монотонный отжиг рекомбинационных центров, характеризуемый увеличением  $\tau$  и происходящий более плавно, чем начальном этапе УЗО (рис. 1, кривая 1). На данном этапе УЗО приводит к остаточной диссоциации рекомбинационно-активных дефектов, образуемых при развале комплексов  $C-O-V_2$ .

Следует подчеркнуть, что предложенная выше модель отжига РЦР под действием ультразвука является весьма схематичной. Для установления истинной картины происходящий в облученном кремнии под действием УЗО процессов требуются дальнейшие исследования. Однако наиболее важным является то, что мы экспериментально показали возможность низкотемпературного отжига одного из типов точечных радиационных дефектов в кремнии под действием УЗО.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Института ядерных исследований НАН Украины Т.И. Кибкало и В.Ф. Ластовецкому, а также сотруднику физического факультета КНУ им. Т. Шевченко А.Б. Надточию за помощь, оказанную при подготовке образцов и проведении УЗО.

## Список литературы

- [1] *Ostapenko S.S., Jastrebski L., Lagowski J., Sopori B.* // Appl. Phys. Lett. 1994. V. 65. P. 1555–1557.
- [2] *Koshka Y., Ostapenko S., Ruf T., Zhang J.-M.* // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 69. P. 2537–2539.
- [3] *Ostrovskii I.V., Nadtochiy A.B., Steblenko L.P., Podolyan A.A.* // IEEE International Ultrasonics Symposium. Atlanta, GA, Oct. 7–10, 2001. (<http://www.ieeeuffc.org/archive/ul/proceed/2001/proceed/u0110401.pdf>).
- [4] *Онанко А.П., Подолян А.А., Островский И.В.* // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 15. С. 40–44.
- [5] *Saritas M., McKell H.D.* // J. Appl. Phys. 1988. V. 63. N 9. P. 4561–4567.
- [6] *Конозенко И.Д., Семенюк А.К., Хиврич В.И.* Радиационные эффекты в кремнии. Киев, 1974. 199 с.
- [7] *Вавилов В.С., Киселев В.Ф., Мукашев Б.Н.* Дефекты в кремнии и на его поверхности. М.: Наука, 1990. 216 с.

- [8] Зубрилов А.С., Ковешников С.В. // ФТП. 1991. Т. 25. В. 8. С. 1332–1338.
- [9] Лугаков П.Ф., Лукашевич Т.А., Шуша В.В. // ФТП. 1979. Т. 13. В. 2. С. 401–404.
- [10] Kolkovskii I.I., Lugakov P.F., Shusha V.V. // Phys. stat. sol. (a). 1984. V. 83. № 1. P. 299–306.
- [11] Бургуэн Ж., Ланно М. Точечные дефекты в полупроводниках. Экспериментальные аспекты. М.: Мир, 1985. 304 с. (Пер. с англ. Bourgoin J.C., Lannoo M., Point Defects in Semiconductors II, Experimental Aspects. Springer Series in Solid-State Sciences. Vol. 35. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 1983).