

06;08

## Прямое наблюдение релаксации проводимости в $\gamma$ -облученном кремнии $n$ -типа под влиянием импульсов ультразвука

© Я.М. Олих, Н.Д. Тимочко

Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева НАН Украины,  
Киев

E-mail: jaroluk3@ukr.net

Поступило в Редакцию 4 августа 2010 г.

В облученном и частично отожженном ( $280^\circ\text{C}$ )  $n$ -Si-Fz в интервале температур  $T = 110$ – $180$  К впервые обнаружено обратимое изменение электропроводимости  $\sigma_{\text{US}}$  при импульсном ультразвуковом нагружении (продольные волны: частота  $6$ – $10$  МГц, интенсивность до  $4 \cdot 10^3 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ , длительность импульса  $10^{-5}$ – $10^{-3}$  с). Установлено, что температурные зависимости акустоиндуцированных изменений  $\sigma_{\text{US}}$  (времена нарастания —  $\tau_i$  и спада —  $\tau_d$ ) описываются уравнениями Аррениуса. Из наклона экспериментальных  $\tau_{i,d}(T)$  определены энергии активации соответствующих процессов  $U_i \approx 0.09$  eV,  $U_d \approx 0.13$  eV,  $\tau_i^0 \approx 4 \cdot 10^{-8}$  s,  $\tau_d^0 \approx 10^{-9}$  s. Наблюдаемый эффект интерпретирован как акустоиндуцированный переход метастабильного дефекта между его состояниями.

Многие дефекты в полупроводниках характеризуются би- и метастабильным характером поведения [1–3]. Интерес к метастабильным дефектам (МД) с практической точки зрения обусловлен возможностью управления физическими параметрами полупроводниковых приборов за счет обратимой перестройки подобных комплексов, в частности использования явления бистабильности для создания ячеек памяти нового поколения. Благодаря интенсивным исследованиям с применением электронного парамагнитного резонанса, инфракрасной спектроскопии, нестационарной емкостной спектроскопии и других методик наблюдается значительный прогресс в понимании механизма метастабильности. Было показано, что процессы перестройки атомной конфигурации дефекта и изменение его зарядового состояния часто взаимосвязаны и происходят комплексно. Причиной таких процессов могут быть локаль-

ная деформация, изменение температуры, электромагнитное поле, радиация, а также ультразвук (УЗ) [4–6]. При исследовании возможностей практического применения УЗ для управления структурой дефектов в полупроводниковых кристаллах получен целый ряд экспериментальных результатов. Например, обработка УЗ стимулирует распад [4] и образование [5] различных комплексов, перегруппировку дефектов [6,7], формирование наночастиц [8]. Основным механизмом акустоиндуцированных (АИ) изменений характеристик материала в бездислокационных кристаллах, по нашему мнению, как раз и связан с метастабильным характером отдельных дефектных комплексов. Однако теория взаимодействия УЗ с МД пока отсутствует. Остается неизученной, в частности, и кинетика АИ-изменений электрофизических и фотоэлектрических параметров полупроводников, которая могла бы помочь уточнить механизм воздействия УЗ. Трудности таких исследований связаны с традиционным использованием волн УЗ в непрерывном режиме [4–10], что делает невозможным наблюдение быстрых переходных процессов. В данной работе впервые использован новый методический подход, который состоит в применении УЗ в форме прямоугольных импульсов, что позволяет наблюдать и исследовать динамические (*in situ*) изменения характеристик материала в процессе нагружения УЗ.

Исследовались образцы бездислокационного тигельного кремния *n*-типа проводимости *n*-Si-*Fz*:P; концентрация примесных атомов фосфора, кислорода и углерода составляла:  $N_P \approx 4.8 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ ,  $N_O < 5 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$ ,  $N_C \approx 1.0 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$  соответственно. Акустоактивные дефекты, чувствительные к действию УЗ, создавались путем радиационного облучения  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$ -дозой  $\sim 10^8 \text{ рад}$  при комнатной температуре и дальнейшим специальным отжигом образцов до  $T = 280^\circ\text{C}$  (с шагом  $40^\circ\text{C}$ , длительностью 20 min). Предварительная подготовка обусловлена тем, что, как показано ранее [10], эффективность влияния УЗ в отожженных образцах по сравнению с неотожженными увеличивается. Измерения концентрации  $n_0$  и подвижности  $\mu_0$  электронов в образцах кремния проводились методом эффекта Холла в температурном диапазоне 100–300 К на стандартных прямоугольных образцах в режиме постоянного тока  $I_0 \sim 10^{-6} \text{ А}$  и постоянного магнитного поля  $B = 0.45 \text{ Т}$ . Волна УЗ распространялась вдоль толщины образца 0.45 Т параллельно кристаллографическому направлению  $\langle 110 \rangle$ . Для измерений температурных холловских зависимостей электрофизических параметров использовался азотный криостат, оснащенный акустически-

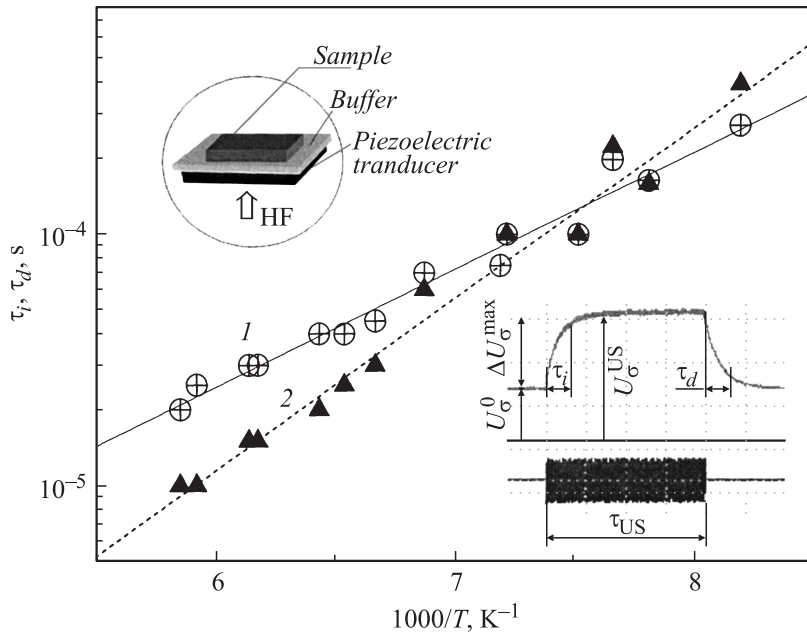
ми элементами [11]. Такая дополнительная оснастка позволяет реализовать возможность последовательных измерений на одном образце при различном состоянии структуры дефектов как в исходном, так и в акустически возмущенном состоянии соответственно. Генерация УЗ производилась с помощью пьезоэлектрического преобразователя — пластины ниобата лития ( $Y + 36^\circ$ )-среза, на которую подавался синусоидальный сигнал от генератора ВЧ. Как было установлено ранее, проводимость  $\sigma_0 = en_0\mu_0$   $\gamma$ -облученных образцов  $n\text{-Si-Fz} : \text{P}$  в интервале 100–200 К определяется глубокими акцепторными уровнями в запрещенной зоне с энергией  $E_c - 0.23 \text{ eV}$  [9]. При нагружении УЗ в непрерывном режиме в диапазоне температур  $T < 200 \text{ K}$  наклон зависимости  $n_{\text{US}}(T)$  несколько увеличивается, а концентрация свободных электронов  $n_{\text{US}}^1$  уменьшается, т.е. наблюдается АИ-изменение  $\Delta n = n_0 - n_{\text{US}}$ . После выключения действия УЗ  $\sigma_{\text{US}}$  возвращается в исходное состояние [10].

При исследовании в данной работе кинетики акустопроводимости  $\sigma_{\text{US}}$  частично отожженных ( $280^\circ\text{C}$ ) образцов  $n\text{-Si-Fz}$  использовался импульсный режим УЗ (несущая частота  $f_{\text{US}} = 5\text{--}10 \text{ MHz}$ , частота повторения импульсов  $F_i = 400 \text{ Hz}$ , длительность радиоимпульсов  $\tau_{\text{US}} = 10^5\text{--}10^{-3} \text{ s}$  и их амплитуда  $V_{\text{US}}$  — до  $20 \text{ V}$ ). В этом варианте на цифровой осциллограф, синхронизированный импульсами ВЧ, с потенциальных контактов образца подается измеряемое напряжение  $U_\sigma^{\text{US}} = kI_0/\sigma_{\text{US}}$  (коэффициент  $k$  определяется размерами образца). При определенных экспериментальных условиях (см. ниже) в случае проявления эффекта акустопроводимости на фоне постоянной компоненты  $U_\sigma$  наблюдается „импульс  $\Delta U_\sigma$ “, соответствующий АИ-уменьшению  $\sigma_{\text{US}}$  (см. осциллограмму на рис. 1). Оказалось, что фронты этого „импульса  $\Delta U_\sigma$ “, определяющиеся продолжительностью нарастания  $\tau_i$  и спада  $\tau_d$  АИ-изменений  $\sigma_{\text{US}}$ , значительно превосходят длительность фронтов импульса ВЧ и при постоянной температуре удовлетворительно описываются экспоненциальными зависимостями (1) и (2) соответственно:

$$\Delta U_\sigma^i(t) = \Delta U_\sigma^{\text{max}}(1 - \exp(-t/\tau_i)), \quad (1)$$

$$\Delta U_\sigma^d(t) = \Delta U_\sigma^{\text{max}} \exp(-t/\tau_d). \quad (2)$$

<sup>1</sup> В дальнейшем физические величины, определяемые в условиях отсутствия влияния УЗ, будем обозначать нижним индексом „0“, а найденные при нагружении УЗ — индексом „US“.

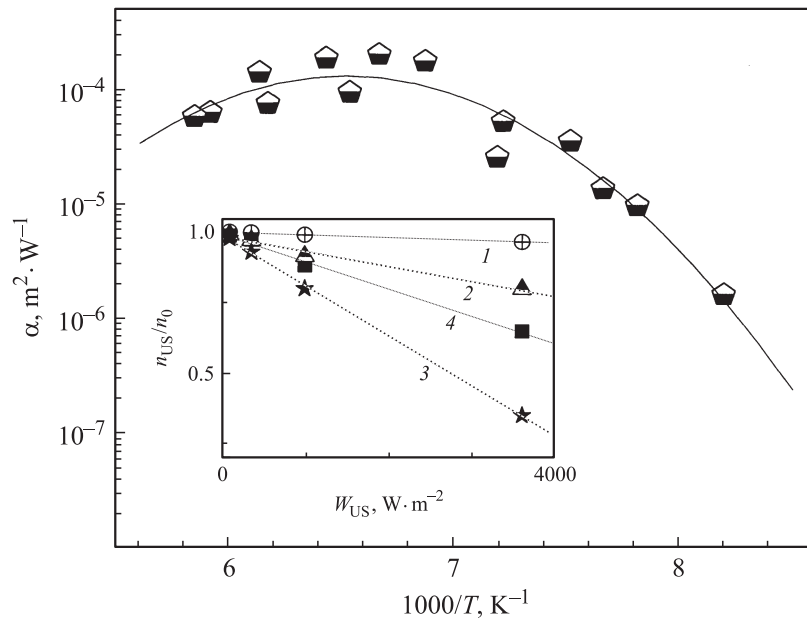


**Рис. 1.** Температурные зависимости времен релаксации: 1 — нарастания  $\tau_i$ ; 2 — спада  $\tau_d$ . Точки — эксперимент, сплошные линии — аппроксимация в соответствии с (3). Вставки: вверху в круге выделен акустический узел — пьезоэлектрический преобразователь, акустический буфер и образец; внизу осциллограммы „импульса  $\Delta U_\sigma$ “ на образце и импульса ВЧ на пьезопреобразователе.

Температурные исследования „импульса  $\Delta U_\sigma$ “, проведенные при постоянной  $W_{US} \approx 4 \cdot 10^3 \text{Wt} \cdot \text{m}^{-2}$  (интенсивность УЗ в импульсе  $W_{US} = c(V_{US})^2$ ; параметр  $c$  определяется экспериментально), показали, что зависимости  $\tau_i(T)$  и  $\tau_d(T)$  являются термоактивированными, т.е. описываются в координатах Аррениуса:

$$\tau_{i,d}(T) = \tau_{i,d}^0 \exp(E_{i,d}/kT), \quad (3)$$

где  $E_{i,d}$  — энергии активации соответствующих процессов. Аппроксимация экспериментальных данных  $t_{i,d}(T)$  в соответствии с (3)



**Рис. 2.** Температурная зависимость коэффициента эффективности воздействия УЗ  $\alpha$ . На вставке амплитудные характеристики относительных изменений концентрации электронов при разных  $T$ , К: 1 — 128; 2 — 133; 3 — 142; 4 — 163.

(рис. 1) позволила определить значения величин  $E_i \approx 0.09 \pm 0.01$  eV,  $E_d \approx 0.13 \pm 0.01$  eV и  $\tau_i^0 \approx 4 \cdot 10^{-8}$  s,  $\tau_d^0 \approx 10^{-9}$  s.

В работе исследованы также амплитудные характеристики  $\Delta U_\sigma = f(W_{US})$ . Учитывая, что при фиксированной температуре  $U_\sigma^0 = kI_0/en_0\mu_0$  и  $U_\sigma^{US} = kI_0/en_{US}\mu_{US}$ , рассчитаны относительные АИ-изменения концентрации свободных электронов в образце  $(n_{US}/n_0) = (U_\sigma^0/U_\sigma^{US})$ . При расчете, в соответствии с предыдущими нашими экспериментами [9,10], полагалось, что  $\mu_{US}(T) \approx \mu_0(T)$ . Действительно, в области температур  $T > 125$  К рассеяние электронов определяется колебаниями решетки, и их подвижность практически не зависит от УЗ. Как видно на рис. 2 (вставка), при всех температурах величина „импульсных“ АИ-изменений концентрации электронов проводимости

$\Delta n_{US} = (n_0 - n_{US})$  прямо пропорциональна  $W_{US}$ :

$$n_{US}/n_0 = 1 - \alpha W_{US}, \quad (4)$$

где коэффициент пропорциональности  $\alpha$ , характеризующий эффективность воздействия УЗ, также зависит от температуры (рис. 2). Отметим здесь, что максимальное АИ-изменение  $\Delta n^{\max} \approx 2 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$  достигается при  $T \approx 150 \text{ К}$ .

В заключение рассмотрения экспериментальных результатов дополнительно отметим следующие установленные факты: 1) АИ-эффекты не связаны с тепловым воздействием — максимальный разогрев УЗ образца при импульсных нагрузках  $< 0.1 \text{ К}$ ; 2) влияние магнитного поля на  $\Delta U_{\sigma}$  не обнаружено; 3) новые дефекты в результате нагрузений УЗ как в непрерывном, так и в импульсном режимах не образуются (эффекты обратимы), микроструктура образца не изменяется.

Вопрос идентификации акустоактивного центра ( $C_s - C_i$ ,  $P_s - C_i$ , дивакансионные дефекты), обнаруженного в  $\gamma$ -облученных и частично отожженных образцах  $n\text{-Si-Fz}$ , остается открытым, и для выяснения механизма АИ-переходов потребуются дальнейшие исследования. Наиболее важным результатом работы является впервые наблюдаемый в режиме реального времени (*in situ*) процесс акустоиндуцированного обратимого перехода дефектной системы полупроводникового кристалла в возбужденное состояние. Это открывает дополнительные возможности как для изучения акустоактивных дефектов в полупроводниковых материалах, так и для разработки импульсных акустоуправляемых устройств.

Авторы благодарят В.М. Бабича за предоставленные для исследований образцы кремния.

## Список литературы

- [1] Song L.W., Zhan X.D., Benson B.W. et al. // Phys. Rev. B. Condensed Matter. 1990. V. 42. N 9. P. 5765–5783.
- [2] Вавилов В.С., Киселев В.Ф., Мукашев Б.Н. Дефекты в кремнии. М.: Наука, 1990. 216 с.
- [3] Мукашев Б.Н., Абдуллин Х.А., Горелкинский Ю.В. // УФН. 2000. Т. 170. В. 2. С. 143–155.
- [4] Подольян А.А., Хиврич В.И. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. В. 10. С. 11–16.

- [5] *Парчинский П.Б., Власов С.И., Лигай Л.Г.* // ФТП. 2006. Т. 40. В. 7. С. 829–832.
- [6] *Romanuk B., Kladko V., Olikh Ya.* et al. // Mater. Sci. in Semicond. Processing. 2005. V. 8. N 4. P. 171–175.
- [7] *Олих О.Я.* // ФТП. 2009. Т. 43. В. 6. С. 774–779.
- [8] *Romanuk A., Melnik V., Olikh Ya.* et al. // J. Luminescence. 2010. V. 130. N 1. P. 87–91.
- [9] *Олих Я.М., Тимочко Н.Д., Долголенко А.П.* // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 13. С. 67–73.
- [10] *Babuch V.M., Olikh Ja.M., Tymochko M.D.* // SPQEO. 2009. V. 12. N 4. P. 375–378.
- [11] *Олих Я.М., Савкина Р.К.* // УФЖ. 1997. Т. 42. № 11–12. С. 1385–1389.