

06;08

Прямое наблюдение релаксации проводимости в γ -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°C) n -Si-Fz в интервале температур $T = 110\text{--}180\text{ K}$ впервые обнаружено обратимое изменение электропроводимости σ_{US} при импульсном ультразвуковом нагружении (продольные волны: частота $6\text{--}10\text{ MHz}$, интенсивность до $4 \cdot 10^3\text{ Wt} \cdot \text{m}^{-2}$, длительность импульса $10^{-5}\text{--}10^{-3}\text{ s}$). Установлено, что температурные зависимости акустоиндуцированных изменений σ_{US} (времена нарастания — τ_i и спада — τ_d) описываются уравнениями Аррениуса. Из наклона экспериментальных $\tau_{i,d}(T)$ определены энергии активации соответствующих процессов $U_i \approx 0.09\text{ eV}$, $U_d \approx 0.13\text{ eV}$, $\tau_i^0 \approx 4 \cdot 10^{-8}\text{ s}$, $\tau_d^0 \approx 10^{-9}\text{ s}$. 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 γ -квантами ^{60}Co -дозой $\sim 10^8 \text{ рад}$ при комнатной температуре и дальнейшим специальным отжигом образцов до $T = 280^\circ\text{C}$ (с шагом 40°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 μ_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 $\sigma_0 = en_0\mu_0$ γ -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_{US}^1 уменьшается, т.е. наблюдается АИ-изменение $\Delta n = n_0 - n_{\text{US}}$. После выключения действия УЗ σ_{US} возвращается в исходное состояние [10].

При исследовании в данной работе кинетики акустопроводимости σ_{US} частично отожженных (280°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_{US} — до 20 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_σ наблюдается „импульс ΔU_σ “, соответствующий АИ-уменьшению σ_{US} (см. осциллограмму на рис. 1). Оказалось, что фронты этого „импульса ΔU_σ “, определяющиеся продолжительностью нарастания τ_i и спада τ_d АИ-изменений σ_{US} , значительно превосходят длительность фронтов импульса ВЧ и при постоянной температуре удовлетворительно описываются экспоненциальными зависимостями (1) и (2) соответственно:

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

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

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

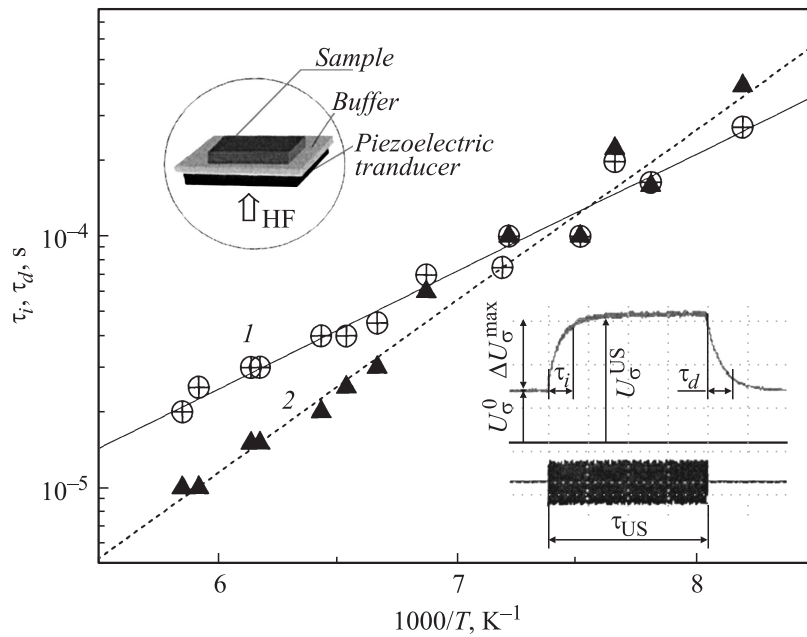


Рис. 1. Температурные зависимости времен релаксации: 1 — нарастания τ_i ; 2 — спада τ_d . Точки — эксперимент, сплошные линии — аппроксимация в соответствии с (3). Вставки: вверху в круге выделен акустический узел — пьезоэлектрический преобразователь, акустический буфер и образец; внизу осциллограммы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

Температурные исследования „импульса ΔU_σ “, 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)

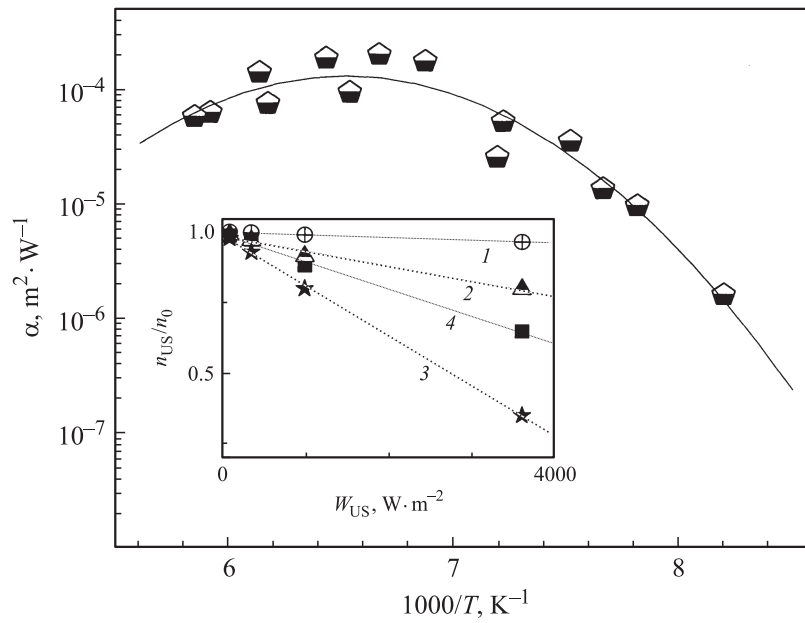


Рис. 2. Температурная зависимость коэффициента эффективности воздействия УЗ α . На вставке амплитудные характеристики относительных изменений концентрации электронов при разных T , К: 1 — 128; 2 — 133; 3 — 142; 4 — 163.

(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

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

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

где коэффициент пропорциональности α , характеризующий эффективность воздействия УЗ, также зависит от температуры (рис. 2). Отметим здесь, что максимальное АИ-изменение $\Delta n^{\text{max}} \approx 2 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$ 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 нагружениях $< 0.1 \text{ К}$; 2) влияние магнитного поля на ΔU_{σ} не обнаружено; 3) новые дефекты в результате нагружений 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 γ -облученных и частично отоженных 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. Бабица 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., Лизгай Л.Г. // ФТП. 2006. Т. 40. В. 7. С. 829–832.
- [6] *Romanyuk 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] *Romanyuk 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] *Babych 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.