

06

Акустостимулированное преобразование радиационных дефектов в γ -облученных кристаллах кремния n -типа

© Я.М. Олих, Н.Д. Тимочко, А.П. Долголенко

Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарёва НАН Украины,
Киев, Украина

E-mail: jaroluk3@ukr.net

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев, Украина

Поступило в Редакцию 24 января 2006 г.

Представлены результаты исследования влияния ультразвуковой (УЗ) обработки ($f_{\text{US}} \sim 4 \div 30$ MHz, $W_{\text{US}} \sim 0.1 \div 2$ W/cm²) на электрическую активность радиационных дефектов в γ -облученных ($D = 10^8, 10^9$ rad) кристаллах n -Si с различным содержанием кислорода ($\sim 10^{18}$ и $< 5 \cdot 10^{15}$ cm⁻³). Из анализа температурных (100 \div 300 K) зависимостей холловских характеристик в предположении многоуровневой структуры центров определены их энергетическое положение и концентрации. Показано, что основными акустоактивными дефектами, изменяющими свойства материала при УЗ обработке, являются: в тигельных образцах — А-центры ($E_c - 0.20$) eV и дивакансии ($E_c - 0.26$) eV; в зонных образцах — дивакансии и/или комплексы $P_s - C_i$ ($E_c - 0.23$) eV.

PACS: 72.50.+b, 61.82.Fk

Известно, что ультразвуковые (УЗ) волны активно взаимодействуют с системой дефектов кристалла и могут быть использованы как для исследований свойств дефектов структуры, так и для управления параметрами материала в целом. Физический механизм УЗ действия на свойства полупроводников определяется взаимодействием упругих и электрических полей УЗ волны и дефектов кристалла [1,2]. Воздействие жесткого излучения (γ -лучей, электронов высоких энергий, нейтронов и т.п.) на кристаллы вызывает появление первичных радиационных дефектов (РД) — вакансий и междоузельных атомов (пары Френкеля), взаимодействие которых с различными несовершенствами структуры может приводить к образованию электрически и оптически активных центров [3]. Традиционным способом восстановления нарушенных свойств облученных материалов является их отжиг; альтернативным —

Рассчитанные значения глубины уровней E_{ai} и их концентрации N_{ai} для электрически активных дефектов, определяющих проводимость γ -облученных образцов n -Si, а также значения концентраций кислорода и углерода (N_O, N_C) в исходных образцах соответственно

Образец	Состояние образца (последовательно)	Номера кривых на рисунках	E_{ai} , eV	N_{ai} , 10^{13} cm^{-3}	Тип дефекта
Si-Cz $n \sim 2.54 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ $N_O \sim 9.5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ $N_C \sim 3.0 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$	Исходный	1	--	--	--
	γ_1 -облучение	2	$E_c - 0.405$	11.9	? + O_i [6]
			$E_c - 0.205$	13.2	$V - O$ [7]
			$E_c - 0.190$	0.5	? + N [8]
	УЗО	3	$E_c - 0.405$	14.4	? + O_i [6]
$E_c - 0.205$			9.0	$V - O$ [7]	
$E_c - 0.190$			2.0	$VO + N$	
γ_2 -облучение	4	$E_c - 0.424$	13.4	V_2^- [7,9]	
		$E_c - 0.261$	12.6	V_2^- [7]	
Рис. 1	УЗО	5	$E_c - 0.424$	13.9	V_2^- [7,9]
			$E_c - 0.261$	9.5	V_2^- [7]
			$E_c - 0.240$	2.6	$V_2^- + C$
Si-Fz $n \sim 4.8 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ $N_O < 5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ $N_C \sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ Рис. 2	Исходный	1	--	--	--
	γ_1 -облучение	2	$E_c - 0.424$	1.3	V_2^- [7,9]
			$E_c - 0.230$	5.2	$V_2^-, P_s - C_i$ [10]
УЗО	3	$E_c - 0.424$	1.7	V_2^- [7,9]	
		$E_c - 0.230$	3.2	$V_2^-, P_s - C_i$ [10]	

может быть ультразвук [4], не только для отжига РД, а и для управления свойствами материала и характеристиками приборов, изготовленных на его основе.

Целью данной работы было исследование процессов перестройки РД под действием УЗ обработки (УЗО) в кристаллах кремния n -типа с разным содержанием кислорода. Для исследований выбраны два типа бездислокационных кристаллов Si: а) Si-Cz, полученный методом

Чохральского, с удельным сопротивлением $\rho \approx 35 \Omega \cdot \text{cm}$; б) Si–Fz, полученный методом зонной плавки в вакууме с $\rho \approx 140 \Omega \cdot \text{cm}$. Содержание фоновых примесей кислорода N_O и углерода N_C приведено в таблице. Измерения концентрации электронов $n(T)$ выполнены методом эффекта Холла в интервале температур $T = 100 \div 300 \text{ K}$. Для создания в образцах Si „акустоактивных“ дефектов, электрическая активность которых изменялась бы при УЗО, образцы облучались γ -квантами ^{60}Co , дозами: $\gamma_1 \sim 10^8 \text{ rad} \approx 1.9 \cdot 10^{17} \gamma/\text{cm}^2$ и $\gamma_2 \sim 10^9 \text{ rad} \approx 1.9 \cdot 10^{18} \gamma/\text{cm}^2$.

Внесенные радиационные нарушения оказались устойчивыми. После γ -облучения часть образцов подвергалась УЗО (продольные волны, частота $4 \div 30 \text{ MHz}$, интенсивность $1 \div 2 \text{ W/cm}^2$, длительность обработки $\sim 10^4 \text{ s}$, температура $< 70^\circ\text{C}$). В отличие от радиационных, изменения $n(T)$, наведенные УЗО оказывались неустойчивыми и через определенное время (несколько суток) параметры образца релаксировали к предыдущему устойчивому состоянию. Отметим, что УЗО исходных, необлученных образцов не приводила к заметным изменениям их электрофизических характеристик.

Результаты измерений $n(T)$ на разных этапах обработки приведены на рис. 1 и 2. Для исходных образцов (кривые 1) $n(T)$ не зависит от температуры, что соответствует полной ионизации мелких доноров — атомов фосфора. С целью определения концентрации N_{ai} и энергетического положения уровней E_{ai} электрически активных РД в исследуемых образцах нами проведен теоретический анализ $n(T)$. Предполагалось, что общая концентрация $n(T) = n_0(T) + n_1(T) + n_2(T) - 2N_b + N_{ai}$, где $n_i(T)$ — составляющие концентрации носителей в зоне проводимости за счет тепловой ионизации соответствующих глубоких акцепторных уровней ($i = 0, 1, 2$), а $N_b = N_d - N_{a0}$.

Расчет $n_i(T)$ производился с помощью следующей системы уравнений [5]:

$$n_i(T) = \frac{1}{2} (N_d - N_{ai} - n_{11}) \left(\sqrt{1 + \frac{4N_d n_{11}}{(N_d - N_{ai} - n_{11})^2}} + 1 \right). \quad (1)$$

Здесь $n_{11} = gN_c \exp(-E_{ai}/kT)$ — концентрация электронов в зоне проводимости при совпадении положений уровня Ферми и акцепторного уровня, $g = 2$ — фактор вырождения акцепторного уровня; N_d, N_{ai} — концентрации исходных доноров и радиационных акцепторов соответственно; N_c — плотность состояний в зоне проводимости.

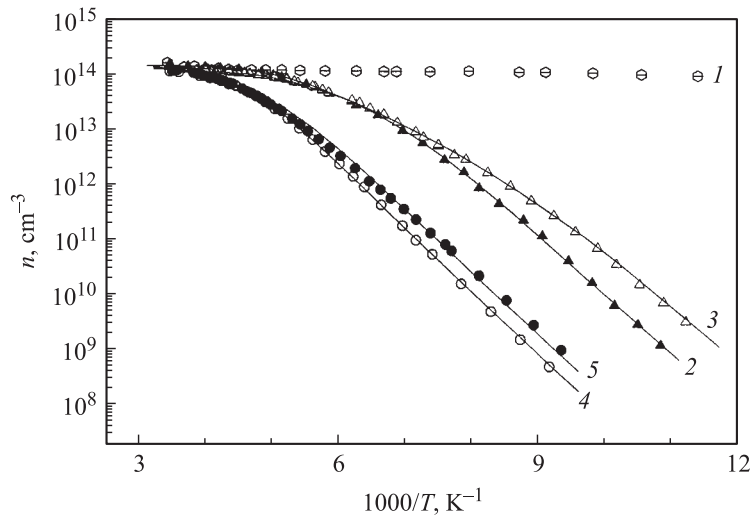


Рис. 1. Температурные зависимости концентрации электронов в образце Si-Cz на разных этапах его обработки. Кривые: 1 — исходное состояние; 2 — после γ_1 -облучения; 3 — после γ_1 -облучения и УЗО; 4 — после γ_2 -облучения; 5 — после γ_2 -облучения и УЗО. Точки — эксперимент, сплошные линии — расчет.

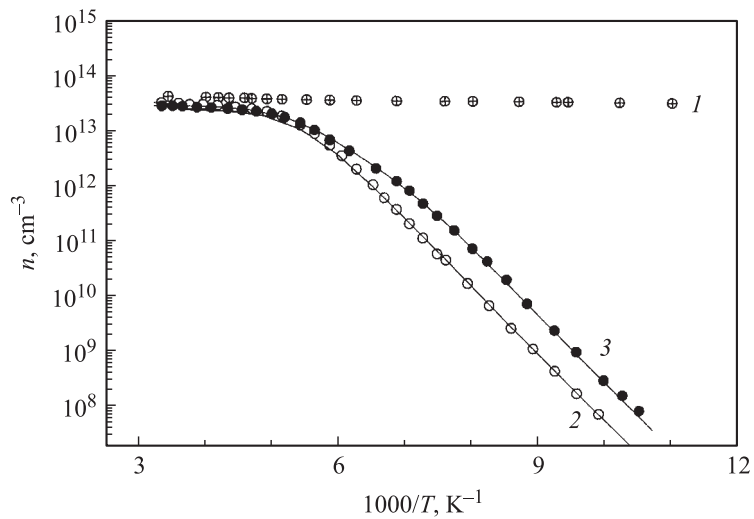


Рис. 2. Si-Fz образец. Кривые 1–3 обозначают то же, что и на рис. 1.

Также предполагается, что точечные дефекты распределены по объему кристалла Si равномерно, а $N_{ai} < N_d$ и полупроводник невырожденный ($N_d < 10^{15} \text{ cm}^{-3}$). Результаты теоретического расчета $n(T)$ представлены на рис. 1 и 2 сплошными линиями (кривые 2–5). Значения N_{ai} находятся путем сопоставления рассчитанной зависимости $n(T)$ с экспериментальной; при этом задаются значения E_{ai} ($i = 0, 1, 2$) и с помощью системы уравнений (1) подбираются соответствующие им N_{ai} до совпадения расчетной кривой с экспериментальными точками. Рассчитанные значения E_{ai} и N_{ai} приведены в таблице. Для Si–Cz образцов найдено, что в результате γ_1 -облучения определяющими $n(T)$ оказались акцепторные уровни ($E_c - 0.424 \text{ eV}$), ($E_c - 0.205 \text{ eV}$) и ($E_c - 0.19 \text{ eV}$); а для Si–Fz — уровни ($E_c - 0.405 \text{ eV}$) и ($E_c - 0.23 \text{ eV}$). Согласно данным многочисленных исследований [6–11 и др.], эти уровни могут принадлежать в первом случае дивакансии V_2^- , А-центру ($V-O$) и неизвестному комплексу, предположительно содержащему азот ($? + N$) соответственно; а во втором — дивакансии V_2^- и/или бистабильному комплексу „фосфор с углеродом“ P_s-C_i .

Наблюдаемые при УЗО динамические (обратимые) изменения $n(T)$ могут происходить в результате некоторых коррелированных преобразований как близко между собой расположенных дефектных комплексов, так и подвижных примесных атомов [10]. Исходя из наших результатов (см. таблицу), можно определенным образом конкретизировать этот механизм УЗ преобразований РД в n -Si. Как известно, междоузельные атомы азота N_i и углерода C_i обладают малой энергией активации и подвижны при комнатной температуре. Полагаем, что для образцов Si–Cz комплекс $V-O$ ($E_c - 0.205 \text{ eV}$), с исходной концентрацией после γ_1 -облучения $N_{(V-O)} = 13.2 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, при УЗО модифицируется атомом подвижной примеси (возможно, азота) и превращается в комплекс $VO + N$ с уровнем ($E_c - 0.19 \text{ eV}$) [8]. При этом уменьшается концентрация $N_{(V-O)} = 9.0 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ и возрастает $N_{(VO+N)} = 2.0 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ соответственно. После прекращения УЗО происходит освобождение атомов азота и „медленное“ возвращение всей системы дефектов в исходное (до УЗО) состояние.

В результате УЗО образцов Si–Fz наблюдается уменьшение концентрации уровня ($E_c - 0.23 \text{ eV}$), возможно, это уровень дивакансии V_2^- и/или пары P_s-C_i [10]. Предполагаем, что часть их „временно“ распадается, а часть переходит в другое состояние. После прекращения УЗО образцов Si–Fz, как и для Si–Cz, происходит релаксация в исходное состояние.

С увеличением дозы облучения до $\gamma_2 \sim 10^9$ rad в Si–Cz в системе электрически активных дефектов преобладают дивакансии V_2^{--} ($E_c - 0.261$ eV) с концентрацией $N_{(V_2^{--})} = 12.6 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$. Теперь электроны находятся на этом более глубоком уровне и уровень А-центра ($E_c - 0.204$ eV) уже не проявляется. При УЗО, как и при отжиге дивакансий [12], наиболее подвижные атомы примеси, предположительно C_i , частично освобождаются со стоков и локализируются вблизи V_2^{--} , возмущая при этом их энергетическое положение. В результате уменьшается $N_{(V_2^{--})} = 9.5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ и возникает уровень ($E_c - 0.24$ eV) с концентрацией $N_{(V_2^{--}+C)} = 2.6 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$. После выключения УЗО C_i покидают V_2^{--} и происходит восстановление уровня $N_{(V_2^{--})} = 12.6 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, система дефектов возвращается в исходное состояние.

Таким образом, впервые обнаружены акустоактивные дефекты в γ -облученных кристаллах n -Si, как в безкислородных, так и в кислородсодержащих. Показано, что основными акустоактивными дефектами являются: в Si–Cz образцах — А-центры ($E_c - 0.20$) eV и дивакансии ($E_c - 0.26$) eV; в Si–Fz — дивакансии и/или комплексы $P_s - C_i$ ($E_c - 0.23$) eV. Предполагается, что УЗО стимулирует „локальную диффузию“ отдельных примесных атомов с образованием новых нестабильных комплексов, а происходящее при этом частичное восстановление электрофизических параметров облученных n -Si, создающее иллюзию отжига РД, в целом таковым не является.

Приносим благодарность В.М. Бабичу и В.И. Хивричу за помощь в постановке эксперимента и обсуждении полученных результатов.

Список литературы

- [1] Подолян А.А., Хиврич В.И. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. В. 10. С. 11–16.
- [2] Парчинский П.Б., Власов С.И., Муминов С.И. и др. // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. В. 10. С. 40–45.
- [3] Конозенко И.Д., Семенов А.К., Хиврич В.И. Радиационные эффекты в кремнии. Киев: Наук. думка, 1974. 200 с.
- [4] Олих Я.М., Карась Н.И. // ФТП. 1996. Т. 30. В. 8. С. 1455–1459.
- [5] Долголенко А.П., Литовченко П.Г., Варенцов М.Д., Гайдар Г.П. // Сб. науч. трудов Института ядерных исследований. Киев, 2003. № 1(9). С. 63–68.
- [6] Brosious P.R. // Proc. Conf. „Defects and Radiation Effects in Semiconductors“. Nice-1978. Bristol–London, Inst. of Phys. 1979. N 46. P. 248.

- [7] *Asghar M., Zafar Iqbal M., Zafar N.* // J. Appl. Phys. 1993. V. 73. N 8. P. 3698–3708.
- [8] *Tokumaru Y., Okushi H., Masui T., Abe Y.* // Jpn. J. Appl. Phys. Part 2. 1982. N 21. P. L443.
- [9] *Moll M., Fretwurst E., Kuhnke M. Lindström G.* // Nucl. Instr. and Meth. B. 2002. V. 186. P. 100–110.
- [10] *Asom M.T., Benton J.L., Sauer R., Kimerling L.C.* // Appl. Phys. Lett. 1987. N 4. P.256–258.
- [11] *Jellison G.E.* // J. Appl. Phys. 1982. V. 53. N 8. P. 5715–5719.
- [12] *Абдуллин Х.А., Мукашев Б.Н., Тамендаров М.Ф.* и др. // ФТП. 1990. Т. 24. В. 2. С. 391–392.