

Я.М. Оліх¹, М.Д. Тимочко¹, О.Я. Оліх²**АКУСТОІНДУКОВАНІ ТЕМПЕРАТУРНІ ОСОБЛИВОСТІ
ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ В CdZnTe:Cl, ОБУМОВЛЕНІ
МЕТАСТАБІЛЬНИМИ DX-ЦЕНТРАМИ**

Виявлено температурний гістерезис електропровідності $\sigma(T)$, спричинений ультразвуком, в сильнокомпенсованих низькоомних кристалах CdZnTe з великою кількістю дислокацій. Для розуміння основних процесів акустоіндукованої перебудови точково-дефектної структури таких кристалів за допомогою методу диференціальної еволюції проведено апроксимацію експериментальних залежностей концентрації та рухливості носіїв заряду при різних напрямках температурної зміни. Оцінено відносний вклад кожного з механізмів розсіювання носіїв (на нейтральних домішках, дислокаціях, іонізованих домішках та ґратці), а також концентрації глибоких та мілких дефектів та їхні зміни під дією ультразвуку. Перебудова складних дефектних комплексів викликана присутністю цинку (можливо, комплексами $[(V_{Zn}^{2-}2Cl_{Te}^{+})^0]$ і $[(V_{Zn}^{2-}Cl_{Te}^{+})^-]$), зокрема, DX-центрами, які під дією ультразвукового навантаження можуть переходити в метастабільний стан.

Ключові слова: ультразвук, монокристали CdZnTe, точкові дефекти, дислокаційні кластери, ефект Холла.

ВСТУП

Особливості протікання струму в сильнокомпенсованих низькоомних кристалах CdZnTe під впливом ультразвуку (УЗ) були досліджені раніше в [1,2]. Дана робота присвячена новому ефекту – температурному гістерезису електропровідності $\sigma(T)$, спричиненому УЗ у кристалах $Cd_{0.96}Zn_{0.04}Te:Cl$ ($N_{Cl} \approx 5 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$) з великою кількістю дислокацій ($N_{dis}^{XR} \approx 4 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-2}$) – див. рис. 1. Для розуміння природи змін $\sigma(T)$ під дією УЗ навантаження досліджено ефект «акусто-Холла» в температурному діапазоні 77-300 К.

ЕКСПЕРИМЕНТ ТА РЕЗУЛЬТАТИ

За допомогою ефекту Холла визначались температурні залежності концентрації носіїв заряду $n(T)$ та рухливості $\mu(T)$ (рис.2а,б). Повздовжня УЗ хвиля (частотою 10 МГц, інтенсивністю до 10^4 Вт/м^2) пропускала через зразок (вставка на рис. 1). Швидкість температурних змін контролювалась з точністю $\sim 0,03 \text{ К/с}$. Деталі експерименту були раніше представлені в [1,2]. Встановлено, що температурна залежність електропровідності $\sigma(T)$ залежить не лише від зміни температури, але й від попереднього стану зразка – див. рис. 1-3. Виявлено, що: а) за відсутності УЗ дії гістерезис $n(T)$ не спостерігається; б) максимум акустоіндукованих (АІ) змін $n(T)$ спостерігається в температурному діапазоні (100÷200) К. У випадку, коли зразок нагрівається, АІ зміни в значеннях $\sigma(T)$ приблизно в 2 рази більші, ніж у випадку охолодження зразка. Побудова рис.3 зроблена з використанням рис. 1 та 2 для визначення окремо (роздільно) відносного вкладу $n(T)$ і $\mu(T)$ в температурну залежність провідності. З рис. 3 видно, що визначальним вкладом в ефект гістерезису є АІ зростання концентрації електронів.

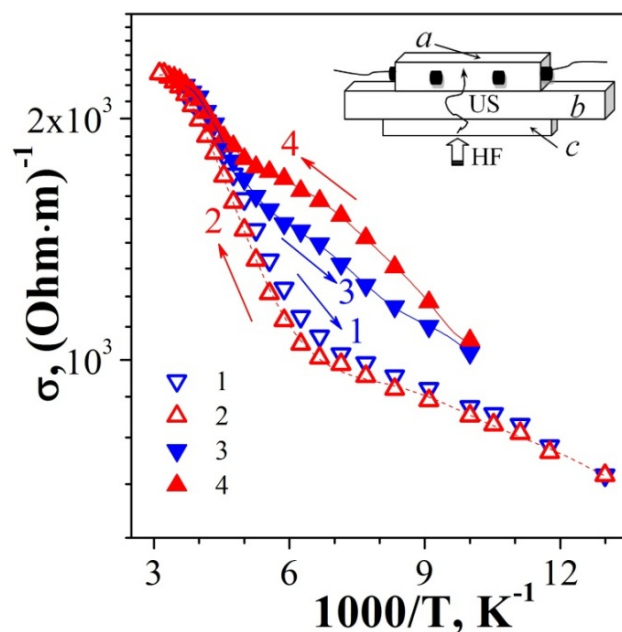


Рис. 1. Температурні залежності провідності $\sigma(T)$ в CdZnTe. Відкриті та заповнені символи відповідають відсутності та присутності УЗ дії ($\sim 0,5 \cdot 10^4$ Вт·м $^{-2}$) відповідно. Криві 1 і 3 отримані у випадку охолодження; криві 2 і 4 – у випадку нагрівання зразка. На всіх рисунках стрілки вказують напрям температурних змін. На вставці зображена схема акустичної комірки: зразок (а), буфер (б), п'єзоелектричний перетворювач (с), висока частота (HF), повздовжня ультразвукова хвиля (US).

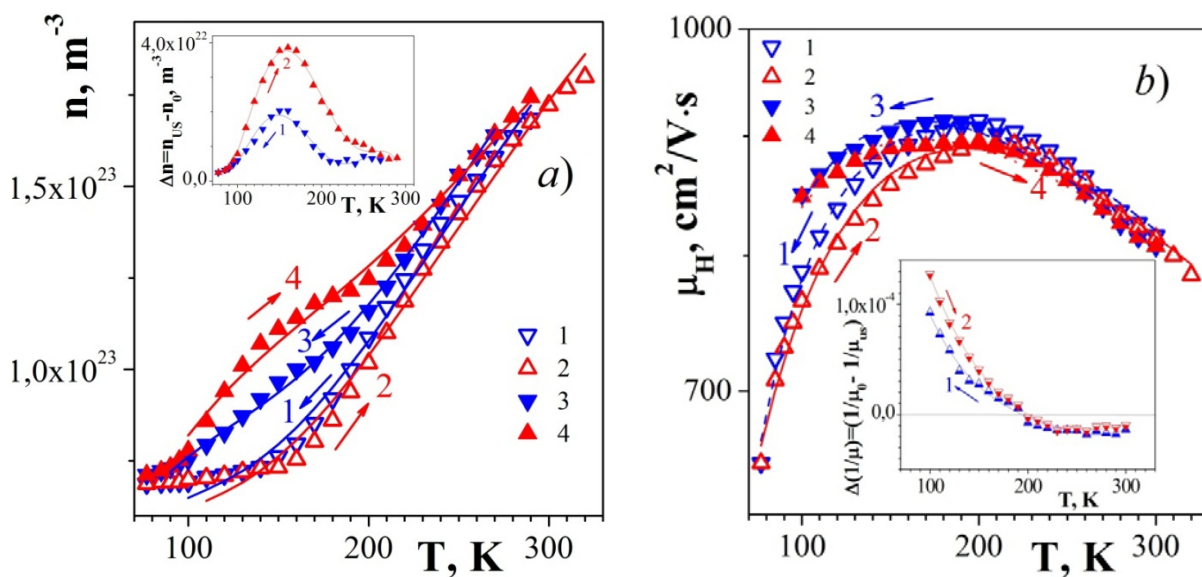


Рис. 2. Температурні залежності концентрації носіїв заряду $n(T)$ (а) та холлівської рухливості $\mu_H(T)$ (б) в зразках CdZnTe, відкриті символи – без ультразвуку, заповнені символи – під дією ультразвукового навантаження ($W_{УЗ} \sim 0,5 \cdot 10^4$ Вт/м 2). Символи відповідають експериментальним даним, а лінії – результат нелінійної апроксимації. На вставці на рис. 2а зображено температурні залежності акустоіндукованих змін концентрації електронів при охолодженні (крива 1) та нагріванні (крива 2). На вставці на рис. 2б зображено температурні залежності акустоіндукованих змін рухливості теж при охолодженні (крива 1) та нагріванні (крива 2).

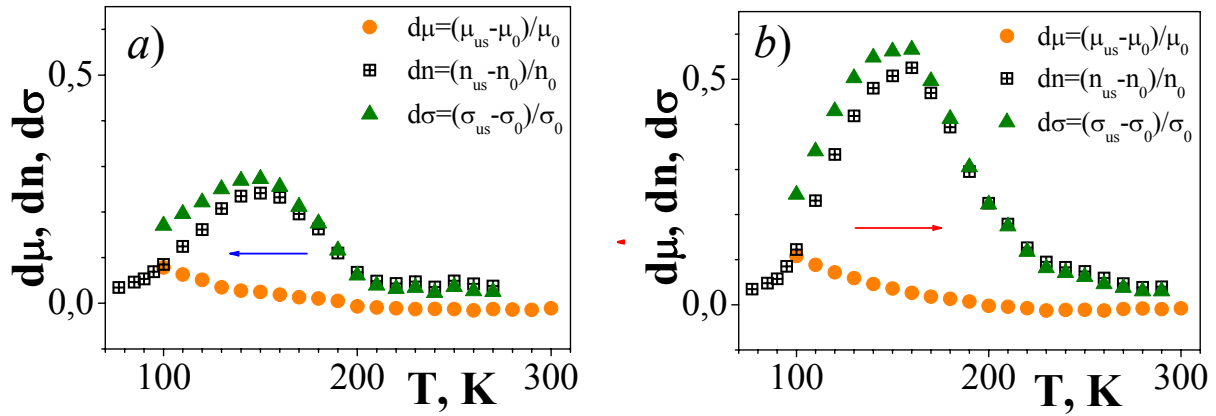


Рис. 3. Відносний вклад концентрації та рухливості в акустоіндуковані зміни провідності при охолодженні (а) та нагріванні (б) в кристалах CdZnTe. Стрілки вказують напрямок зміни температури зразка.

ОБГОВОРЕННЯ

Отже, як було встановлено в [2], АІ зміни $n(T)$ і $\mu(T)$ в кристалах $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ пов'язані з АІ перебудовою (трансформацією) точково-дефектної структури зразка, що виникає переважно в околі кластерів дислокацій.

Апроксимація експериментальних залежностей $\mu_n^{exp}(T)$. Для розуміння основних процесів у нашому випадку, ми провели додаткову перебудову (теоретичну апроксимацію) експериментальних залежностей $n(T)$ і $\mu(T)$. Для цього використовувався метод диференціальної еволюції [3,4]. Результати апроксимації показано лініями на рис. 2 та приведено в Таблиці. Для уточнення механізму дії УЗ на $\mu_n^{exp}(T)$, важливо оцінити відносний вклад кожного з механізмів розсіювання носіїв (на нейтральних домішках, дислокаціях, іонізованих домішках та ґратці) та їхні зміни під дією УЗ. Відповідно до правила Маттіссена можна записати, що загальна рухливість $\mu_n^{exp}(T)$ складається із суми вкладів кожного із механізмів розсіювання:

$$\mu_n^{exp}(T) = (1/a_N T^0 + 1/a_{dis} T + 1/a_{ii} T^{3/2} + 1/a_{Lat} T^{-3/2})^{-1} \quad (1)$$

Бачимо, що даний метод диференціальної еволюції задовільно описує залежності $\mu_n^{exp}(T)$ як вихідні, так і під дією УЗ навантаження. Значення відповідних коефіцієнтів (a_N , a_{dis} , a_{Lat}) приведено в Таблиці.

Апроксимацію експериментальних залежностей $n(T)$ виконано теж методом диференціальної еволюції [3,4] згідно з формулою:

$$n(T) = n_i(T) + N_d [1 - f_{FD}(T, E_d)] - \sum_{j=1}^{j=2} N_{tj} f_{FD}(T, E_{tj}), \quad (2)$$

де N_a – концентрація акцепторів, n_i – власна концентрація, N_d – концентрація донорів, E_d – донорний енергетичний рівень від E_c , N_{tj} і E_{tj} концентрація та енергетичний рівень пастки j th електронного рівня, $f_{FD}(T, E_i)$ – функція розподілу Фермі-Дірака для донорів. Апроксимація за допомогою формули (2) показала, що УЗ навантаження призводить до: а) збільшення концентрації N_{d1} мілких ($E_{d1} < 0,001$ eV) донорів; б) зменшення концентрації N_{d2} глибокого дефекту ($E_{d2} > 0,06$ eV) – див. Таблицю.

Таблиця. Результати апроксимації для експериментальних залежностей рухливості $\mu_n^{exp}(T)$ та концентрації носіїв заряду $n(T)$ для зразків CdZnTe: a_N , a_{dis} , a_{Lat} – коефіцієнти розкладу за степенем T ; N_N – концентрація нейтральних домішок; N_{dis} – густина дислокацій, f – фракція заповнених пасток ($0 \leq f \leq 1$), $N_{dc} = (N_{dis} \cdot f^2)/c$ – концентрація дислокаційних деформаційних центрів, a_{Lat} – складна функція компонентів розсіювання на коливаннях ґратки.

Значення		Охолодження		Нагрів	
Номер кривої (Рис. 1,2)		1	3	2	4
Ультразвук, 10 ⁴ Вт·м ⁻²		0	~0.5	0	~0.5
150 К	$n, 10^{22} \text{ м}^{-3}$	7.9	9.8	7.6	11.5
	$\Delta n=n^{\text{US}}-n^0, 10^{22} \text{ м}^{-3}$	+ 1.9		+3.9	
Результати апроксимації для експериментальних залежностей $\mu_{\text{H}}^{\text{exp}}(T)$ відповідно (1)					
$a_N, \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$		0.2102	0.1660	0.2033	0.1403
$N_N, 10^{22} \text{ м}^{-3}$		7.1	9	7.3	10.7
$\Delta N_N=N_N^{\text{US}}-N_N^0, 10^{22} \text{ м}^{-3}$		+1.9		+3.4	
$a_{\text{dis}}, 10^{-4} \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с} \cdot \text{К}$		14.3	20.2	15.1	24.7
$N_{dc}, 10^{22} \text{ м}^{-3}$		2.4	1.7	2.3	1.4
$\Delta N_{dc}=N_{dc}^{\text{US}}-N_{dc}^0, 10^{22} \text{ м}^{-3}$		- 0.7		- 0.9	
$a_{\text{Lat}}, 10^2 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с} \cdot \text{К}^{3/2}$		9.9	11	11.4	13.5
Результати апроксимації для експериментальних залежностей $n(T)$ відповідно (2)					
$E_{d1}, \text{ eВ}$		<10 ⁻³	0.004	<10 ⁻³	0.008
$N_{d1}, 10^{22} \text{ м}^{-3}$		8.2	11.4	7.8	15.3
$\Delta N_{d1}, 10^{22} \text{ м}^{-3}$		+3.2		+7.5	
$E_{d2}, \text{ eВ}$		0.066	0.073	0.066	0.079
$N_{d2}, 10^{22} \text{ м}^{-3}$		30.0	29.4	28.9	20.6
$\Delta N_{d2}, 10^{22} \text{ м}^{-3}$		-0.6		-8,3	

ВИСНОВКИ

Вважаємо, що гістерезис, спричинений ультразвуком, пояснюється складними дефектними комплексами, викликаний присутністю цинку (можливо, комплексами $[(V_{Zn}^{2-} - 2Cl_{Te}^{+})^0]$ і $[(V_{Zn}^{2-} - Cl_{Te}^{+})^-]$), оскільки гістерезис у CdTe не спостерігався. Зокрема, такими дефектами можуть бути DX-центри, які під дією ультразвукового навантаження можуть переходити в метастабільний стан [5]. Для з'ясування окремих деталей механізму необхідні додаткові дослідження.

ACOUSTIC-INDUCED TEMPERATURE PECULIARITIES OF ELECTRICAL CONDUCTIVITY IN CdZnTe:Cl DUE TO METASTABLE DX CENTERS

In low-resist crystals Cd_{0.96}Zn_{0.04}Te:Cl ($N_{Cl} \approx 5 \cdot 10^{24} \text{ m}^{-3}$) the peculiarities of the ultrasound (US) influence on the temperature characteristics (77÷300) K of electrical conductivity $\sigma(T)$ were revealed, which were determined not only by temperature but also the direction of its change. Thus $\sigma(T)$ depends on the previous state of the sample – from the direction of temperature change, or in the process of heating or cooling. We observe the following: а) hysteresis $\sigma(T)$ without of US does not appear; б) the maximum acoustic-induced changes $\sigma(T)$ are observed at temperatures (100÷200) K. In the process of the sample heating, after the pre-cooling, the value of the acoustic-induced changes $\sigma(T)$ is ~2 times greater than for the cooling. A separate comparison of the acoustical-induced electron concentration and their mobility magnitude, which are received from independent Hall measurements. In order to understand what processes occur in our case, we have carried out additional theoretical approximations such as the method of differential evolution of experimental concentration and mobility curves $n(T)$ and $\mu(T)$. It allowed to establish that the determining contribution to the hysteresis effect $\sigma(T)$ is acoustic-induced residual growth of the electron concentration. To clarify the mechanism of the US action at $\mu_H^{exp}(T)$, it is important to estimate the relative contribution of each scattering mechanisms of carriers (on the neutral impurities, dislocations, ionized impurities and lattice) and their changes under US.

We believe that hysteresis in CdZnTe crystals caused by ultrasound is explained by composite defect complexes, due to the presence of zinc (possibly complexes $[(V_{Zn}^{2-}2Cl_{Te}^{+})^0]$ i $[(V_{Zn}^{2-}Cl_{Te}^{+})^-]$), because hysteresis is not observed in CdTe crystals. In particular, such defects can be DX centers, which under the action of ultrasonic loading can go into a metastable state.

Keywords: ultrasound, CdZnTe single crystals, point defects, dislocation clusters, Hall effect.

1. Olikh Ya.M., Tymochko M.D. Superlattices and Microstructures. 2016. 95. No.7. P.78-82.
2. Olikh Ya.M., Tymochko M.D., Olikh O.Ya., and Shenderovsky V.A. Journal of Electronic Materials. 2018. 47, No.8. P. 4370-4378.
3. Wang K, Ye M., Solid-State Electron. 53(2), 234 (2009).
4. Olikh O.Ya. Journal of Applied Physics. 118, 024502 (2015).
5. Беляев А.Е., фон Барделебен Х.Ю., Оборина Е.И., Рябченко Ю.С., Савчук А.У., Фийе М.Л., Шейнкман М.К. ФТП, 28, 1544 (1994).

¹Інститут фізики напівпровідників
ім. В.Є. Лашкарьова НАН України
41, проспект Науки,
03680 Київ, Україна

Отримано 16.10.2019

²Київський національний університет
ім. Тараса Шевченка
4Г, проспект Ак. Глушкова,
01033 Київ, Україна