

# ACOUSTOELECTRONIC SENSORS

---

## АКУСТОЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ

---

---

УДК 621.315.592.2, 534.27

PACS: 62;71;72:43.35.Ty

### ВПЛИВ УЛЬТРАЗВУКУ НА ПРОТІКАННЯ СТРУМУ В НИЗЬКООМНИХ КРИСТАЛАХ CdTe:Cl

*Я. М. Оліх<sup>1</sup>, М. Д. Тимочко<sup>1</sup>, М. І. Ілащук<sup>2</sup>, О. А. Парфенюк<sup>2</sup>, К. С. Ульяницький<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України, пр. Науки 41, Київ, Україна, 03028, тел. (044)525-62-56, e-mail: jaroluk3@ukr.net, tymochko@ukr.net

<sup>2</sup>Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича, вул. Коцюбинського, 2, Чернівці, Україна, 58012, e-mail: m.ilashchuk@chnu.edu.ua, o.parfenyuk@chnu.edu.ua

### ВПЛИВ УЛЬТРАЗВУКУ НА ПРОТІКАННЯ СТРУМУ В НИЗЬКООМНИХ КРИСТАЛАХ CdTe:Cl

*Я. М. Оліх, М. Д. Тимочко, М. І. Ілащук, О. А. Парфенюк, К. С. Ульяницький*

**Анотація.** В низькоомних кристалах CdTe:Cl *n*-типу ( $N_{Cl} \approx 10^{24} \text{ m}^{-3}$ ) вперше спостережено динамічні (*in-situ*, повністю зворотні) акустостимульовані (АС) зміни провідності  $\sigma$ . Для визначення механізму АС явищ проведено дослідження температурних залежностей (77÷300 K) концентрації і рухливості електронів в умовах дії ультразвуку (УЗ) ( $f_{US} \sim 10$  МГц,  $W_{US} \sim (0,1 \div 2,0) \cdot 10^4 \text{ Wt/m}^2$ ) та кінетики релаксації  $\sigma(t)$  при ввімкненні та вимкненні УЗ. Запропоновано акусто-дислокаційний механізм, який пов'язує: а) «миттєві» ( $t < 1$  сек) зміни  $\sigma(t)$  з додатковим розсіюванням носіїв заряду на дислокаціях та кластерах точкових дефектів, які коливаються в УЗ полі; б) довготривалі (50÷500) сек температурно-залежні релаксації  $\sigma(t)$  є результатом дифузійної перебудови точково-дефектної структури в об'ємі кластера, включаючи перетворення акцепторного комплексу  $[(V_{Cd}^{2-}Cl_{Te}^{+})]$  в нейтральний  $[(V_{Cd}^{2-}2Cl_{Te}^{+})^0]$ .

**Ключові слова:** ультразвук, дислокації, телурид кадмію, ефект Холла

## EFFECT OF ULTRASOUND ON THE CURRENT FLOW IN LOW-RESISTANCE CRYSTALS OF CdTe:Cl

*Ya. M. Olikh, M. D. Tymochko, M. I. Ilashchuk, O. A. Parfenyuk and K. S. Ulyanytskiy*

**Abstract.** The first this paper presents acousto-stimulated (AS) phenomena in low ohmic resistance n-type CdTe:Cl monocrystals ( $N_{Cl} \approx 10^{24} \text{ m}^{-3}$ ) in dynamic regime (*in-situ*, fully reverse). For identification of the nature of acoustically-active defects a temperature investigations (77÷300 K) of electron concentration and mobility under ultrasound (US) influence ( $f_{US} \sim 10 \text{ MHz}$ ,  $W_{US} \sim (0,1 \div 2,0) \cdot 10^4 \text{ Wt/m}^2$ ) and kinetics of relaxation  $\sigma(t)$  at US-on as well as at US-off have been carried out. There were proposed an acousto-dislocation mechanism that links: а) short-term ( $t < 1 \text{ sec}$ ) changes  $\sigma(t)$  – with additional the charge carrier scattering on dislocations and clusters of point defects, that vibrate at US field; б) long-term (50÷500) sec temperature-dependent relaxations  $\sigma(t)$  are the result of diffusive process of the point-defect structure modification, including transformation an acceptor complex  $[(V_{Cd}^{2-}Cl_{Te}^{+})^-]$  into neutral one  $[(V_{Cd}^{2-}2Cl_{Te}^{+})^0]$ .

**Keywords:** ultrasound, dislocations, CdTe monocrystals, Hall effect

## ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКА НА ПРОХОЖДЕНИЕ ТОКА В НИЗКООМНЫХ КРИСТАЛЛАХ CdTe:Cl

*Я. М. Олих, Н. Д. Тимочко, М. И. Илащук, О. А. Парфенюк, К. С. Ульяницкий*

**Аннотация.** В низкоомных кристаллах CdTe:Cl *n*- типа ( $N_{Cl} \approx 10^{24} \text{ m}^{-3}$ ) впервые обнаружены динамические (полностью обратимые) акустостимулированные (АС) изменения проводимости  $\sigma$ . Для определения механизма АС явлений проведено исследование температурных зависимостей (77÷300 K) концентрации и подвижности электронов в условиях действия ультразвука (УЗ) ( $f_{US} \sim 10 \text{ MHz}$ ,  $W_{US} \sim (0,1 \div 2,0) \cdot 10^4 \text{ Wt/m}^2$ ) и кинетики релаксации  $\sigma(t)$  при включении и выключении УЗ. Предложен акусто-дислокационный механизм, который связывает: а) "мгновенные" ( $t < 1 \text{ sec}$ ) изменения  $\sigma(t)$  с дополнительным рассеиванием носителей заряда на дислокациях и кластерах точечных дефектов, которые колеблются в УЗ поле; б) длинновременные (50÷500) sec температурно-зависимые релаксации  $\sigma(t)$  являются результатом диффузионной перестройки точечно-дефектной структуры внутри кластера, включая превращение акцепторного комплекса  $[(V_{Cd}^{2-}Cl_{Te}^{+})^-]$  в нейтральный –  $[(V_{Cd}^{2-}2Cl_{Te}^{+})^0]$ .

**Ключевые слова:** ультразвук, дислокации, теллурид кадмия, эффект Холла

## 1. Вступ

Монокристали телуриду кадмію використовуються для виробництва неохолоджуванних детекторів X- та  $\gamma$ -випромінювання для радіаційного моніторингу навколишнього середовища. Цікавими для практичного застосування є кристали з домішкою хлору, яка може заміщати телур у вузлах ґратки або в парі з вакансіями кадмію утворювати метастабільні комплекси [1,2]. Провідність у легованих кристалах CdTe:Cl визначається складними ефектами компенсації за участю як власних, так і введених дефектів та комплексів на їх основі.

Для покращення структурної якості кристалів  $A_2B_6$  використовують різні фізичні обробки:  $\gamma$ -опромінювання, термічний відпал, обробку у водні, НВЧ-опромінювання, а також ультразвукову (УЗ) обробку [3,4]. Враховуючи велику густину дислокацій ( $\rho_d \sim 10^{10} \text{m}^{-2}$ ) і високу ефективність акусто-дислокаційної взаємодії, УЗ виявляється найбільш простим із перелічених вище зовнішніх дій, і може призводити до трансформації домішково-дефектних комплексів та відповідної залишкової зміни електрофізичних параметрів напівпровідникових кристалів  $A_2B_6$  (CdS, ZnS, CdTe, ZnCdTe, CdHgTe) [3]. Основною моделлю, яка пояснює ці зміни, є дислокаційна. Поширення інтенсивної УЗ хвилі викликає коливання дислокацій; причому, при інтенсивностях  $W_{US} \sim 10^4 \text{Wt} \cdot \text{m}^{-2}$  і  $\rho_{dis} \sim 10^{10} \text{m}^{-2}$  акустостимульована (АС) перебудова дефектів відбувається фактично у всьому об'ємі зразка. Вважається, що під дією УЗ хвилі відбувається «захоплення» чи «звільнення» електрично активних точкових дефектів з дислокацій, які є для них «стоками» [3,5]. Відмітимо, що, в залежності від стану домішково-дефектної структури (ДДС) і параметрів УЗ хвилі, на експерименті можуть реалізовуватися як залишкові зміни, так і тимчасові, які спостерігаються лише під час дії УЗ.

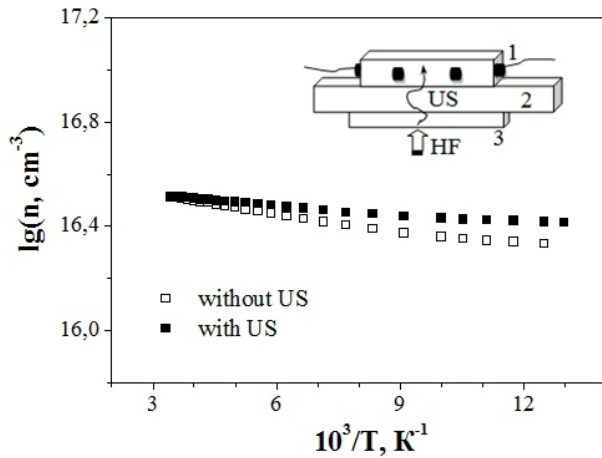
Особливістю досліджуваних низькоомних зразків CdTe:Cl з точки зору дії УЗ є не тільки висока  $\rho_{dis}$ , але й різноманітність дефектних комплексів, що містять домішку Cl. Відомо, що в кристалах з високою провідністю концентрація донорних центрів  $Cl_{Te}^{+} \rightarrow V_{Cd}^{2-}$ . При цьому частина атомів Cl знаходиться на акцепторних  $[(V_{Cd}^{2-}Cl_{Te}^{+})]$  та нейтральних

$(V_{Cd}^{2-}2Cl_{Te}^{+})^0$ ,  $(V_{Cd}^{-}Cl_{Te}^{+})^0$  комплексах. Ще частина атомів Cl захоплена на обірвані зв'язки на дислокаціях. Отже, в умовах УЗ навантаження така складна ДДС кристала в результаті АС зростання коефіцієнта дифузії окремих точкових дефектів (можливе збільшення коефіцієнта дифузії майже у  $10^3$  раз [6]) може ставати суттєво лабільною навіть при низьких температурах ( $<300 \text{K}$ ), що виглядає сприятливим для дослідження АС ефектів. В даній роботі основну увагу приділено динамічним АС змінам електрофізичних (ЕФ) властивостей зразків CdTe:Cl, механізм яких залишається маловивченим. Саме динамічний режим дії УЗ, коли має місце зворотній характер виявлених змін провідності, дозволяє методично відслідковувати перехідні процеси і кінетику релаксації [4].

## 2. Зразки та експеримент

У роботі досліджено вплив УЗ на електрофізичні характеристики об'ємних монокристалічних зразків (розмір  $\approx 2 \times 3 \times 8 \text{mm}^3$ ) CdTe:Cl. Кристали телуриду кадмію були отримані вертикальним методом Бріджмена при низьких значеннях тиску парів кадмію в ампулі [7]. Концентрація домішки хлору у розплаві складала  $N_{Cl}^0 \approx 10^{24} \text{m}^{-3}$ . Формування омичних контактів здійснювалось методом термовакуумного напилення індію за температури  $175^\circ\text{C}$ . Для визначення ЕФ параметрів (концентрації  $n$  та рухливості  $\mu$  носіїв струму) в діапазоні температур  $77 \div 300 \text{K}$  використано метод Холла в режимі постійних електричного і магнітного полів. Для вимірювання ЕФ параметрів в умовах УЗ навантаження (метод акустохолла) використовувався азотний кріостат, обладнаний акустичними елементами. Це дозволяло послідовно проводити вимірювання на одному зразку з різним станом ДДС, як у вихідному, так і в акустично збуреному, відповідно [8]. Введення в зразок поздовжніх УЗ хвиль (частотою  $\sim 10 \text{MHz}$ , інтенсивністю до  $2 \cdot 10^4 \text{Wt/m}^2$ ) здійснювалось через діелектричну буферну пластину за допомогою п'єзоелектричного перетворювача – пластини ніобата літію ( $Y+36^\circ$ )-зрізу, на яку подавався синусоїдальний сигнал від ВЧ генератора (див. вставку на рис.1). Точність вимірювання електричних сигналів  $\sim 10^{-6} \text{V}$ , температури  $\sim 0,1 \text{K}$ .

Зміна температури зразка при вимірюваннях в умовах УЗ навантаження впродовж часу вимірювання окремої експериментальної точки не перевищувала 2÷3 К.



**Рис. 1.** CdTe:Cl. Температурні залежності концентрації носіїв заряду: світлі точки – без УЗ; затемнені точки – під дією УЗ навантаження  $W_{US} \approx 2 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>. На вставці схема акустичного вузла: 1 – зразок; 2 – буферна пластина; 3 – п'єзоелектричний перетворювач.

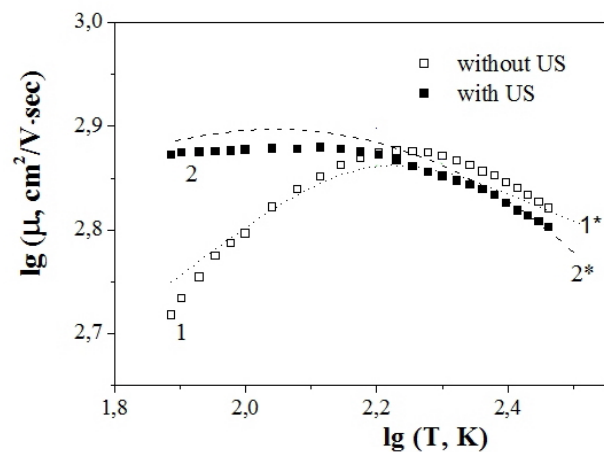
### 3. Результати та їх обговорення

Встановлено, що спостережувані АС зміни коефіцієнта Холла  $R_H$  та провідності  $\sigma$  зворотні. При ввімкненні УЗ та після припинення акустичної дії відбувається повільне (50÷500) сек, залежно від температури зразка та інтенсивності УЗ) встановлення параметрів зразка та їх повернення в початковий стан, відповідно. На рис.1-3 приведені вже рівноважні (зрелаксовані) значення параметрів.

#### 3.1. Температурні залежності концентрації носіїв заряду

На рис. 1 представлено температурну залежність концентрації електронів  $n$ . Крива 1 відповідає вихідним характеристикам кристалу – без дії УЗ. При УЗ навантаженні (крива 2) концентрація електронів збільшується – при кімнатних температурах несуттєво, але при пониженні до азотних температур АС зміни сягають ~20%. Зауважимо, що  $n(T)$  як у вихідному зразку, так і під дією УЗ навантаження у всій температурній області вимірювання слабо залежить від температури, що харак-

терно для області виснаження домішкового донорного рівня, іонізація якого відповідає за утворення вільних електронів у зоні провідності CdTe [10]. Оскільки виснаження енергетичного рівня проявляється вже при низьких температурах ( $T \approx 77$  К), то можна вважати, що глибина залягання мілкового донорного рівня у досліджуваних кристалах CdTe:Cl становить  $< 0,01$  eV. Згідно літературних даних такий енергетичний рівень відповідає ізольованому точковому дефекту  $Cl_{Te}^+$  [9]. Незначні температурні зміни  $n_e(T)$  та деяке зростання її величини в області низьких температур при дії УЗ можуть бути зумовлені як зміною значення холл-фактора внаслідок залежності його величини від механізму розсіювання [10], так і додатковим АС звільненням електронів з дислокацій та при трансформації метастабільних акцепторних дефектів в нейтральний стан (див. нижче).



**Рис. 2.** CdTe:Cl. Температурні залежності холлівської рухливості носіїв заряду без (світлі точки 1) та при дії УЗ навантаження (затемнені точки 2). Крива 1\* – розрахована з врахуванням розсіювання електронів на теплових коливаннях кристалічної ґратки та іонізованих домішках ( $N_I = 7,6 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>); крива 2\* – розрахована з врахуванням розсіювання електронів на теплових коливаннях кристалічної ґратки, іонізованих домішках ( $N_I = 5,0 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>) та п'єзоелектричному потенціалі.

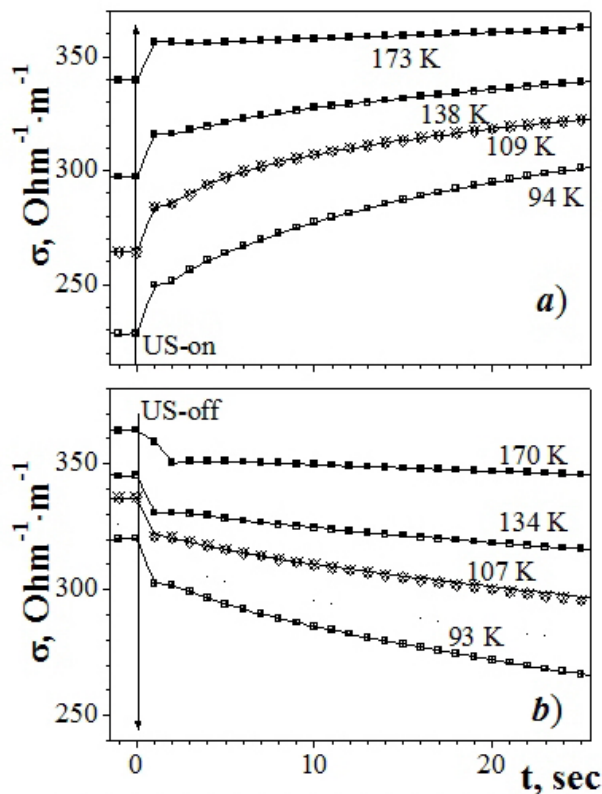


Рис. 3. CdTe:Cl. Часові залежності питомої електропровідності зразка CdTe:Cl при різних температурах при ввімкненні УЗ навантаження  $W_{US} \approx 2 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$ , серія верхніх кривих (а) та при вимкненні, внизу (б), відповідно.

### 3.2. Температурні залежності рухливості носіїв заряду

На рис. 2 приведені температурні залежності рухливості електронів  $\mu_n(T)$  як при відсутності УЗ (крива 1), так і під дією УЗ навантаження (крива 2). З рисунка видно, що поширення УЗ хвилі у кристалі істотно впливає на  $\mu_n^{us}(T)$  в області низьких температур, приводячи до значного збільшення величини  $\mu_n$ . Навпаки, в області температур близьких до кімнатної при дії УЗ спостерігається деяке зниження  $\mu_n$ . Відзначимо, що приведені результати добре корелюють з даними досліджень впливу УЗ на  $\mu_n(T)$  у кристалах  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  [11,12].

Також необхідно підкреслити, що значення рухливості навіть при кімнатних температурах виявляються дещо низькими, що свідчить про значний вклад розсіювання носіїв заряду на неоднорідностях кристалу, обумовлених

кластерами домішок в CdTe:Cl [13, 14]. Питання врахування такого розсіювання в наших зразках потребує додаткового дослідження. В даній роботі для якісних оцінок впливу УЗ на ДДС кристала формально використано класичну модель однорідного напівпровідника.

На експериментальній залежності 1 спостерігаються дві відмінні температурні ділянки  $\mu_n(T)$ , які загалом відповідають основним механізмам розсіювання носіїв заряду в напівпровідниках [10]. В області низьких температур ( $T < 150 \text{ K}$ ) переважаючим є розсіювання на іонізованих домішках, а в області температур близьких до кімнатної ( $T > 180 \text{ K}$ ) – на теплових коливаннях кристалічної ґратки. Дійсно, з урахуванням цих двох механізмів розсіювання вдається задовільно описати експеримент  $\mu_n(T)$  (рис.2, крива 1\*). Найкраще співпадіння експериментальної та розрахованої кривих 1 та 1\* виходить при використаних значеннях  $n \approx 2,7 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$  та  $N_1^0 \approx 7,6 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$  ( $N_1$ - концентрація іонізованих домішок в моделі Брукса-Херрінга). Крива 2, отримана при УЗ навантаженні. При високих температурах ( $T > 150 \text{ K}$ ) характер зміни  $\mu_n^{us}(T)$  не змінюється, лише спостерігається деяке зменшення величини  $\mu_n^{us}(T)$ . В той же час в області низьких температур ( $T < 140 \text{ K}$ ) при дії УЗ спостерігається збільшення величини  $\mu_n^{us}(T)$ , яка стає практично незалежною від температури. Це означає, що при УЗ навантаженні відбувається певна зміна основних механізмів розсіювання носіїв заряду.

Для задовільного узгодження розрахованої кривої 2\* з експериментальною залежністю 2 в області високих температур ( $T > 200 \text{ K}$ ) проведений розрахунок  $\mu_n^{us}(T)$  з формальним залученням додаткового розсіювання на п'єзоелектричному потенціалі ( $\mu_{ph} = AT^{-1/2}$ , де  $A$ –деякий ефективний коефіцієнт, який практично не залежить від температури, підбирається при розрахунку) дозволив отримати задовільне узгодження розрахованої кривої 2\* з експериментальною залежністю 2. Зауважимо, що конкретний розрахунок  $A$ -коефіцієнта для випадку УЗ збуреної фононної системи кристала не представляється можливим. Для низькотемпературної області ( $T < 150 \text{ K}$ ) вважається, що основним залишається розсіювання на іонізованих домішках і у випадку

дії УЗ. При цьому підібрана концентрація центрів розсіювання становила  $N_I^{us} \approx 5,0 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$ . Порівнюючи підібрані значення концентрації іонізованих домішок у вихідному зразку ( $N_I \approx 7,6 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$ ) та при УЗ навантаженні ( $N_I^{us} \approx 5,0 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$ ) можна допустити, що частина точкових дефектів ( $\Delta N_I = N_I^0 - N_I^{us}$ ) перебудовується. Правдоподібно вважати, що зменшення  $N_I^0$ , при збереженні майже постійного значення концентрації носіїв заряду (згідно рис. 1 не перевищує  $5 \cdot 10^{21} \text{ m}^{-3}$ ), зумовлене головним чином утворенням при УЗ дії нейтральних комплексів за участю глибоких електрично-активних центрів донорного та акцепторного типу [15]. При цьому додаткове розсіювання на нейтральних комплексах, утворених при УЗ, не компенсує зміну ефективності розсіювання в результаті зменшення концентрації іонізованих домішок.

### 3.3. Релаксація провідності при ввімкненні та вимкненні ультразвуку

На рис.3 приведені часові зміни залежностей питомої електропровідності  $\sigma(t)$  зразка для різних температур при ввімкненні УЗ навантаження (серія верхніх кривих) та при його вимкненні (внизу), відповідно. Характер релаксації  $\sigma(t)$ , як при ввімкненні УЗ, так і при його вимкненні має зворотний характер. Загальна тривалість релаксації дещо зростає зі зниженням температури зразка і свідчить про довготривалі механізми АС перебудови ДДС кристала. Причому, як вже відзначалося вище, навіть довгочасне УЗ навантаження зразка не призводить до залишкової зміни параметрів кристалу. При більш детальному розгляді видно, що АС релаксація  $\sigma(t)$  загалом не являється монотонною, а відбувається, як мінімум, в дві стадії. Дійсно, в момент УЗ ввімкнення (вимкнення) спочатку відбувається стрибкоподібна зміна  $\sigma(t)$ , яка в подальшому переходить в довготривалу монотонну релаксацію. Наближені оцінки тривалості першої стадії дають значення  $\tau_1 < 1,0$  сек. В той же час тривалість другої стадії  $\tau_2$  складає (50÷500) сек.

Аналіз початкових ділянок релаксаційних кривих на другій стадії  $\sigma_2(t)$ , отриманих при низьких температурах 79÷109 К, показав, що вони можуть бути описані експоненційною залежністю  $\sigma(t) = \sigma_0 \exp(-t/\tau)$  (рис. 4), де

$\sigma_0$  – електропровідність зразка в рівноважних умовах,  $\tau$  – час релаксації. Це дало змогу визначити значення  $\tau$  при різних температурах. Побудована залежність  $\lg \tau = f(10^3/T)$  (вставка на рис.4) є лінійною, що вказує на експоненційний характер зміни  $\tau(T) = \tau_0 \exp(W_p/kT)$ , де  $W_p$  – енергія активації процесу. Визначена із вказаної залежності величина  $W_p$  виявилася приблизно рівною 0,02 eV. Двохстадійний характер АС змін ЕФ параметрів в CdTe:Cl говорить про два механізми перебудови ДДС кристала. Вважаємо, що за «миттєві» стрибкоподібні зміни  $\sigma(t)$ , на які припадає  $\sim(10\div 20)\%$  загальних АС змін  $\sigma$ , відповідають акустоактивні метастабільні (при дії УЗ) кластери дефектів. В якості таких дефектів можуть бути дислокаційні кластери (неоднорідності), які в умовах УЗ навантаження змінюють як розмір, так і потенціал, а відповідно й ефективність розсіювання на них носіїв заряду. Можливо  $W_p \approx 0,02$  eV – величина потенціального бар'єру, що характеризує неоднорідності.

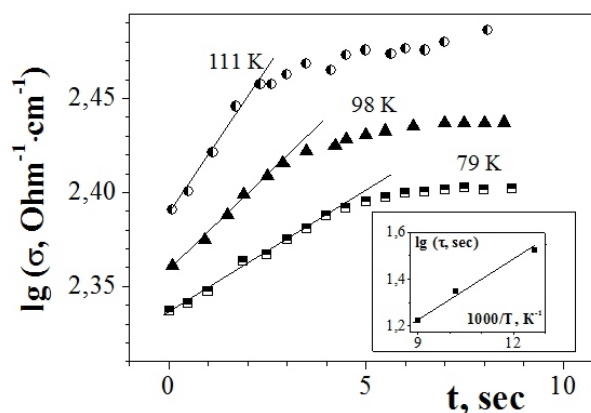


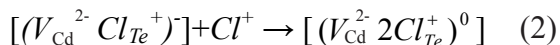
Рис. 4. CdTe:Cl. Початкові ділянки  $\sigma_2(t)$  при ввімкненні УЗ навантаження  $W_{us} \approx 2 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$  за 79, 98 та 111 К, відповідно. На вставці температурна залежність характерної часової сталої  $\tau_0$ .

В той же час за довготривалі релаксації  $\sigma(t)$ , на нашу думку, відповідають дифузійні АС процеси, в яких визначальна роль належить дислокаціям. Це можуть бути як процеси «захоплення» чи «звільнення» рухливих електрично-активних точкових дефектів з дислокацій [5,11,12]; можлива й прискорена дифузія окремих точкових дефектів вздовж (або в околі) дислокації, що інтенсивно коливається під

дією УЗ [6, 12]. Питання потребує додатково-го вивчення. Проте приведені нижче числові оцінки на основі розрахунків ЕФ параметрів з наших експериментальних даних підтверджують цю модель. Нагадаємо, що загальна концентрація домішки хлору в розплаві складала  $N_{Cl}^0 \approx 10^{24} \text{ m}^{-3}$ . Вважаємо, що розподіл легованої домішки між дефектними комплексами, які містять атоми Cl, наступний: а) частина атомів Cl створює ізольований точковий дефект  $Cl_{Te}^+$ , який, в основному, визначає донорний рівень  $N_D$  ( $E_C - 0,01 \text{ eV}$ ) [1,2]; б) частина атомів Cl знаходиться на акцепторних  $[(V_{Cd}^{2-}Cl_{Te}^+)^-]$  та нейтральних  $(V_{Cd}^{2-}2Cl_{Te}^+)^0$ ,  $(V_{Cd}^-Cl_{Te}^+)^0$  комплексах  $N_A$ ; в) частина атомів Cl захоплена на обірвані зв'язки на дислокаціях  $N_{Cl}^{dis}$ . Тобто:

$$N_{Cl}^0 \approx N_D + N_A + N_{Cl}^{dis} \quad (1)$$

Вважаємо, що основним механізмом АС перебудови ДДС є приєднання атома Cl до акцепторного комплексу:



В результаті цієї АС хімічної реакції концентрація іонізованих домішок зменшується, як було показано вище (див.п.3.2), на  $\Delta N_I = N_I^0 - N_I^{us} \approx 2,6 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$ . При цьому для реалізації реакції (2) потрібно ще стільки ж атомів Cl. Оскільки  $n_e$  при УЗ навантаженні фактично не зменшується, а навіть дещо (на ~20%) зростає, необхідно шукати інші джерела цих атомів Cl. Приймаємо, що таким джерелом являються дислокації; отже можна вважати, що  $N_{Cl}^{dis} = \Delta N_I \approx 2,6 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$ . Далі, враховуючи що у вихідному зразку  $N_I^0 = n_e + 2N_A = N_D + N_A \approx 7,6 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$ , а  $n_e = N_D - N_A \approx 2,7 \cdot 10^{22} \text{ m}^{-3}$ , знаходимо, що  $N_D \approx 3,9 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$  та  $N_A \approx 3,7 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$ . Таким чином, згідно (1) отримуємо:  $N_{Cl}^0 \approx 3,9 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3} + 3,7 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3} + 2,6 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3} \approx 10,2 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$ , що майже відповідає заданій вихідній концентрації легуючої домішки.

При вимкненні УЗ навантаження має спостерігатися зворотний процес, оскільки вірогідність утворення акцепторного комплексу  $[(V_{Cd}^{2-}Cl_{Te}^+)^-]$  в рівноважному стані (без УЗ) значно більша чим  $[(V_{Cd}^{2-}2Cl_{Te}^+)^0]$  [1,15].

#### 4. Висновки

Виявлено довготривалі акустостимульовані зміни ЕФ параметрів кристалів CdTe:Cl, які проявляються тільки під час дії УЗ. Аналіз температурних характеристик концентрації та холлівської рухливості носіїв заряду показав, що основними механізмами розсіювання носіїв заряду у вихідних зразках є розсіювання на теплових коливаннях кристалічної ґратки та іонізованих домішках. При УЗ навантаженні у кристалах CdTe:Cl згідно розрахунків зменшується розсіювання носіїв заряду на іонізованих домішках та стає вагомим розсіювання на акустичних фонах збуреного кристалу. Двохстадійний характер АС змін ЕФ параметрів в CdTe:Cl свідчить про два механізми перебудови ДДС кристала. Причому за «миттєві» стрибкоподібні зміни  $\sigma(t)$ , на які припадає ~ (10÷20)% загальних АС змін  $s$ , відповідають АС ефекти, пов'язані з розсіюванням на дислокаційних кластерах точкових дефектів, що збурюються в момент включення/вимкнення УЗ. В той же час за довготривалі релаксації  $\sigma(t)$  відповідають дифузійні АС процеси в об'ємі кластерів, в результаті яких відбувається перерозподіл домішкових атомів Cl і трансформація заряджених акцепторних комплексів  $[(V_{Cd}^{2-}Cl_{Te}^+)^-]$  в нейтральні  $(V_{Cd}^{2-}2Cl_{Te}^+)^0$  [1,2].

#### 5. Список використаної літератури

1. D. V. Korbutyak, S. V. Mel'nichuk, E. V. Korbut, and M. M. Borisyuk, Cadmium Telluride: Impurity Defect States and Detector Properties. Ivan Fedoriv, K. 198 s. (2000).
2. N. V. Agrinskaja and V. V. Shashkova. Metastabil'nye tsentry v nizkoomnyh kristallah CdTe:Cl n-tipa // Fiz. Tekh. Poluprov. 24(4), pp.697-701 (1990).
3. Ya. M. Olikh and O. Ya. Olikh. Active ultrasound effects and their future usage in sensor electronics // Sens. elektron. mikrosist. tehnol. №1, pp.19-29 (2004).
4. Ya. M. Olikh and M. D. Tymochko. In situ observation of the relaxation of conductivity in  $\gamma$ -irradiated n-type silicon under the action of ultrasound pulses // Tech. Phys. Lett. 37(1), pp. 37-40 (2011).
5. A. I. Vlasenko, Ya. M. Olikh, and

- R. K. Savkina. Akustostimulirovannaya aktivatsiya svyazannykh defektov v tverdykh rastvorakh // Fiz. Tekh. Poluprov. 33(2), pp.410–414 (1999).
6. Ya. M. Olikh and Yu. I. Shavlyuk. Akustostimulirovannoe podavlenie shuma v kristallakh  $Cd_xHg_{1-x}Te$  // Fiz. Tverd. Tela 38(11), pp.3365–3371 (1996).
  7. M. I. Ilashchuk, V. V. Matlak, O. A. Parfenyuk, A. V. Savits'ky, A. I. Skytsko. Vliyanie neodnorodnostej na elektrofizicheskie svojstva CdTe:Ge // Ukr. J. Phys. 31(1), pp.126-128 (1986).
  8. Ya. M. Olikh and R. K. Savkina. Akustostymul'ovanyj zsum temperatury inversiyi znaka koefitsiyenta Kholla u radiatsijno-legovanykh krystalakh germaniyu // Ukr. J. Phys. 42(11-12), pp.1385-1389 (1997).
  9. O. A. Matveev and A. I. Terent'ev. Osnovnye printsipy poslerostovogo otzhiga CdTe:Cl dlya polucheniya poluizoliruyushchih kristallov // Fiz. Tekh. Poluprov. 34(11), pp. 1316 -1321 (2000).
  10. Physics and Chemistry A<sup>III</sup>B<sup>VI</sup> compounds: Trans. from English ed. S.A Medvedev. Mir, M. 624 s. (1970).
  11. A. I. Vlasenko, Ya. M. Olikh, and R. K. Savkina. Podvizhnost' nositelej zaryada v kristallakh n-Cd<sub>x</sub>Hg<sub>1-x</sub>Te v usloviyah dinami-cheskogo ul'trazvukovogo nagru-zheniya // Fiz. Tekh. Poluprov. 34(6), pp. 670-676 (2000).
  12. Ya. M. Olikh, S. E. Ostapov, and M. D. Tymochko. Influence of ultrasonic treatment on electrophysical properties of HgMnTe and HgCdMnTe single crystals // Ukr. J. Phys. 50(10), pp.1145-1152 (2005).
  13. M. V. Alekseenko, E. N. Arkad'eva, and O. A. Matveev. O vliyanii neodnorodnostej na podvizhnost' elektronov v telluride kadmiya // Fiz. Tekh. Poluprov. 4(2), pp. 414-416 (1970).
  14. O. A. Matveev and A. I. Terent'ev. Samokompensatsiya v CdTe<Cl> v usloviyah fazovogo ravnovesiya kristallar kadmiya tellura // Fiz. Tekh. Poluprov. 32(2), pp.159-165 (1998).
  15. Ya. M. Olikh, M. D. Tymochko, M.I Ilashchuk. Metastabil'nyy kharakter diy akustychnoyi khvyli na elektrychnu providnist' CdTe:Cl // Tezy dopovidey 6-yi Mizhnarodnoyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi "Sensorna elektronika ta mikrosistemni tekhnologiji" (SEMST-6). Odesa, p. 99 (2014).

Стаття надійшла до редакції 29.12.2015 р.



PACS: 62;71;72:43.35.Ty

UDC 621.315.592.2, 534.27

## EFFECT OF ULTRASOUND ON THE CURRENT FLOW IN LOW-RESISTANCE CRYSTALS OF CdTe:Cl

*Ya. M. Olikh<sup>1</sup>, M. D. Tymochko<sup>1</sup>, M. I. Ilashchuk<sup>2</sup>, O. A. Parfenyuk<sup>2</sup> and K. S. Ulyanytskiy<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>V. E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics, NAS of Ukraine, pr. Nauky 41, Kyiv, Ukraine, 03028. Phone: (044)525-62-56, e-mail: jaroluk3@ukr.net, tymochko@ukr.net.

<sup>2</sup>Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Kotsjubyns'kogo st., 2, Chernivtsi, Ukraine, 58012, e-mail: m.ilashchuk@chnu.edu.ua, o.parfenyuk@chnu.edu.ua.

### Summary

For the purpose of identification of the ultrasound (US) dynamic action on the electro-physical (EPH) parameters of semiconductor crystals CdTe:Cl ( $N_{\text{Cl}} \approx 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ) the temperature investigations (77÷300 K) of Hall effect and relaxation processes of the conductivity  $\sigma(t)$  at US switching-on as well as at US switching-off ( $f_{\text{US}} \approx 10 \text{ MHz}$ ,  $W_{\text{US}} \approx 10^4 \text{ Wt/m}^2$ ) have been carried out. For the first time the long-term acousto-stimulated (AS) changes of the electron concentration and Hall mobility have been found out that can be seen only during the US influence. Analysis of temperature characteristics showed that the main mechanisms of carrier scattering in the initial samples are scattering on thermal vibrations of crystal lattice and ionized impurities. With ultrasound loading an additional carrier scattering on piezoelectric potential, US oscillating dislocations and point-defect clusters takes place. Two-stage nature of the AS changes  $\sigma(t)$  indicates the two mechanisms of impurity-defect structure of the crystal rebuilding. Moreover, for “instantaneous” jump-like changes  $\sigma(t)$ , that account ~ (10÷20)% overall AS changes  $\sigma(t)$  correspond to effects associated with scattering by dislocations. At the same time, diffusion AS processes inside of clusters are responsible for the long-term relaxation  $\sigma(t)$ , in the results of which a redistribution of impurity atoms Cl and a transformation of the charged acceptor complexes  $[(V_{\text{Cd}}^{2-}\text{Cl}_{\text{Te}}^+)]$  into neutral  $[(V_{\text{Cd}}^{2-}2\text{Cl}_{\text{Te}}^+)^0]$  take place.

**Keywords:** ultrasound, dislocations, CdTe monocrystals, Hall effect

УДК 621.315.592.2, 534.27

PACS: 62;71;72:43.35.Ty

## ВПЛИВ УЛЬТРАЗВУКУ НА ПРОТІКАННЯ СТРУМУ В НИЗЬКООМНИХ КРИСТАЛАХ CdTe:Cl

*Я. М. Оліх<sup>1</sup>, М. Д. Тимочко<sup>1</sup>, М. І. Плацук<sup>2</sup>, О. А. Парфенюк<sup>2</sup>, К. С. Уляницький<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України, пр. Науки 41, Київ, Україна, 03028, тел. (044)525-62-56, e-mail: jaroluk3@ukr.net, tymochko@ukr.net.

<sup>2</sup>Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича, вул. Коцюбинського, 2, Чернівці, Україна, 58012, e-mail: m.ilashchuk@chnu.edu.ua, o.parfenyuk@chnu.edu.ua.

### Реферат

З метою в'яснення механізму динамічної дії ультразвуку (УЗ) на електрофізичні параметри напівпровідникових кристалів CdTe:Cl ( $N_{\text{Cl}} \approx 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ) проведено температурні (77÷300 К) дослідження ефекту Холла та кінетики релаксації електропровідності  $\sigma(t)$  при ввімкненні та вимкненні УЗ ( $f_{\text{US}} \approx 10 \text{ MHz}$ ,  $W_{\text{US}} \sim 10^4 \text{ Wt/m}^2$ ). Вперше виявлено довготривалі акустостимульовані (АС) зміни концентрації та холлівської рухливості носіїв заряду, які проявляються тільки під час УЗ дії. Аналіз температурних характеристик показав, що основними механізмами розсіювання носіїв заряду у вихідних зразках є розсіювання на теплових коливаннях кристалічної ґратки та іонізованих домішках. При УЗ навантаженні виникає додаткове розсіювання носіїв заряду на п'єзоелектричному потенціалі, дислокаціях та кластерах точкових дефектів, які вимушено коливаються в УЗ полі. Двохстадійний характер АС зміни  $\sigma(t)$  свідчить про два механізми перебудови домішково-дефектної структури кристала. Причому за «миттєві» стрибкоподібні зміни  $\sigma(t)$ , що становлять  $\sim(10\div 20)\%$  всіх АС змін  $\sigma(t)$  відповідають ефекти, пов'язані з розсіюванням на дислокаціях. В той же час за довготривалі релаксації  $\sigma(t)$  відповідають дифузійні АС процеси в кластерів, в результаті яких відбувається перерозподіл домішкових атомів Cl і трансформація заряджених акцепторних комплексів  $[(V_{\text{Cd}}^{2-}\text{Cl}_{\text{Te}}^+)^-]$  в нейтральні  $(V_{\text{Cd}}^{2-}2\text{Cl}_{\text{Te}}^+)^0$ .

**Ключові слова:** ультразвук, дислокації, телурид кадмію, ефект Холла