

О. М. ЧУГАЙ, С. Л. АБАШИН, С. В. ОЛІЙНИК, І. В. ЛУНЬОВ

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», Україна

**ВПЛИВ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ ПОВЕРХНІ НА ДІЕЛЕКТРИЧНІ ТА ФОТОДІЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КРИСТАЛІВ  $A^{IV}B^{VI}$** 

**Предметом** вивчення в роботі є діелектричні та фотодіелектричні властивості кристалів  $A^{IV}B^{VI}$  складу  $ZnSe$  та  $Cd_{1-x}Zn_xTe$ , які вирошені з розплаву, і пов'язані з цими властивостями структурні дефекти та внутрішні пружні поля. **Метою** статі є дослідження закономірностей впливу механічної обробки поверхні шляхом шліфування, полірування та локального навантаження на дефектну структуру в області деформування, а відтак на діелектричні й фотодіелектричні властивості кристалів  $A^{IV}B^{VI}$  зазначеного складу, що важливо з огляду застосування даних кристалів в аерокосмічній техніці. **Завдання:** дослідити закономірності впливу шліфування, полірування та локального деформування отриманої сколюванням поверхні зразків  $ZnSe$  і  $Cd_{1-x}Zn_xTe$  на їхню дефектну структуру, діелектричні та фотодіелектричні властивості, включаючи необоротні зміни властивостей. **Завдання розв'язувались наступними методами:** емнісним методом досліджували діелектричні та фотодіелектричні властивості кристалів; методом скануючої фотодіелектричної спектроскопії вимірювали енергії фотоіонізації локалізованих станів носіїв зарядів в кристалах; поляризаційно-оптичним методом вивчався розподіл залишкових пружних напружень в зразках. **Отримані такі результати.** Шліфування та полірування спричиняє трансформацію власного й домішкового максимумів спектральних залежностей діелектричних параметрів кристалів  $A^{IV}B^{VI}$ , чинить характерний вплив на координатні залежності діелектричних параметрів кристалів  $Cd_{1-x}Zn_xTe$ . Це зумовлено трансформацією локалізованих станів носіїв, що підтверджено дослідженням кристалів  $ZnSe$ . Локальне деформування кристалів  $Cd_{1-x}Zn_xTe$  істотно впливає на їх діелектричні властивості, зокрема, зумовлює релаксацію діелектричних параметрів. **Висновки.** Механічна обробка поверхні кристалів  $A^{IV}B^{VI}$  шліфуванням і поліруванням, а також локальне механічне навантаження зразків  $Cd_{1-x}Zn_xTe$  істотно впливає на їх діелектричні та фотодіелектричні властивості, що пов'язано з утворенням системи дефектів та внутрішніх пружних полів в областях деформування. Наводиться пояснення спостережених ефектів.

**Ключові слова:** кристали  $A^{IV}B^{VI}$ ; кристали  $ZnSe$ ; кристали  $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ; механічне шліфування та полірування; зосереджене деформування; діелектричні властивості; фотодіелектричні властивості.

**Вступ. Мета роботи**

Напівпровідникові матеріали, що застосовуються у аерокосмічній техніці, нерідко піддаються механічному впливу тих чи інших природних та виробничих чинників [1, 2]. Так, відомо, що сонячні фотоелементи системи енергопостачання космічних апаратів піддаються дії метеорної ерозії [2]. Виробництво подібних фотоелементів пов'язано з операцією шліфування та полірування. Крім того, потрапляння літаків з сонячними батареями у області атмосферних опадів типу граду також може створювати механічний вплив на напівпровідникові фотоелементи. Зауважимо, що до напівпровідникових матеріалів, які використовують для створення сонячних фотоелементів, відносять кристали  $A^{IV}B^{VI}$ , а саме  $ZnSe$  і  $Cd_{1-x}Zn_xTe$  [3]. Вплив механічної обробки на діелектричні та фотодіелектричні властивості таких кристалів мало досліджений. Тому висвітлення

цього питання має як наукову, так і практичну цінність. Отже мета даної роботи полягала у визначенні закономірностей впливу механічної обробки різних типів на діелектричні та фотодіелектричні властивості кристалів  $ZnSe$  і  $Cd_{1-x}Zn_xTe$ .

**1. Зразки та методика експерименту**

Досліджені зразки  $ZnSe$  і  $Cd_{1-x}Zn_xTe$  мали форму пластини 8 x 10 x 15 мм. Поверхні зразків були отримані сколюванням по площинам спайності (110), піддавалися хімічному травлінню, шліфуванню, поліруванню та механічному навантаженню. Операції шліфування, полірування і хімічного травлення поверхні виконували за стандартною технологією обробки оптичних елементів [4]. В якості травителя застосовували розчин броду в етанолі. Спектральні залежності діелектричних параметрів зразків вимірювали

емнісним методом з використанням системи плоских електродів за низької інтенсивності монохроматичного фотозбудження на частоті 1 кГц. Енергію фотоіонізації локалізованих станів кристалів визначали методом скануючої фотодіелектричної спектроскопії [5].

Механічне навантаження зразків виконували індентором у вигляді сталевого конуса. Прикладена до нього сила становила 50 гс. Розподіл залишкових пружних напружень в області локального навантаження зразка визначали за допомогою поляризаційного мікроскопа, забезпеченого CCD – камерою. Поляризаторами слугували призми Аренса. Розподіл у зразку ефективних значень діелектричної проникності  $\epsilon'_{ef}$  і тангенса кута діелектричних втрат  $tg\delta_{ef}$  досліджували на частоті електричного поля 10 кГц методом, заснованим на використанні системи з нерухомого плоского і рухомого сферичного електродів.

## 2. Результати та аналіз

### 2.1. Вплив механічної обробки на фотодіелектричні властивості кристалів ZnSe та $Cd_{1-x}Zn_xTe$

На рисунках 1 і 2 наведені типові спектральні залежності прирощень під дією світла ефективних значень діелектричної проникності  $\Delta\epsilon'_{ef}$  і тангенса кута діелектричних втрат  $\Delta tg\delta$ , отримані після різних видів обробки поверхні зразків  $Cd_{1-x}Zn_xTe$ . На залежностях спостерігається перерозподіл висот власного (короткохвильового) і домішкового максимумів на користь першого при переході від шліфованої до полірованої і, нарешті, хімічно травленої поверхні зразка. Відзначимо, що при цьому також спостерігається зсув домішкового максимуму в область довгих хвиль. Зазначимо, що спектральні залежності  $\Delta\epsilon'_{ef}$  і  $\Delta tg\delta$  кристалів ZnSe якісно подібні наведеним.

Специфічна трансформація висот власного й домішкового максимумів може бути пояснена зміною швидкості рекомбінації нерівноважних носіїв внаслідок погіршення досконалості кристалічної структури при механічній обробці. Вірогідно, зсув домішкового максимуму можна пояснити зміною дефектної структури у приповерхневій області внаслідок полірування та шліфування. На користь цього припущення свідчить той факт, що згадані види обробки спричиняють утворення дислокацій та пов'язаних з ними локалізованих станів у забороненій зоні кристалів [6, 7]. Наявність змін енергетичного спектру локалізованих станів у забороненій зоні кристалів

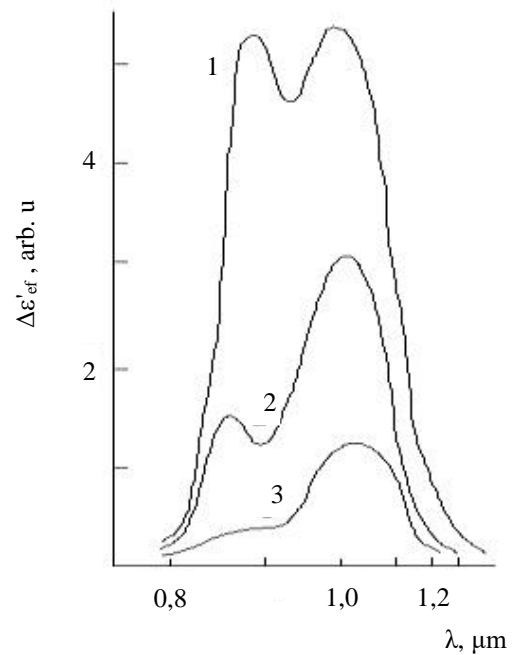


Рис. 1. Спектральний розподіл діелектричної проникності у кристалах  $Cd_{1-x}Zn_xTe$ , поверхня яких була послідовно піддана хімічному травленню (1), поліруванню (2) і шліфуванню (3)

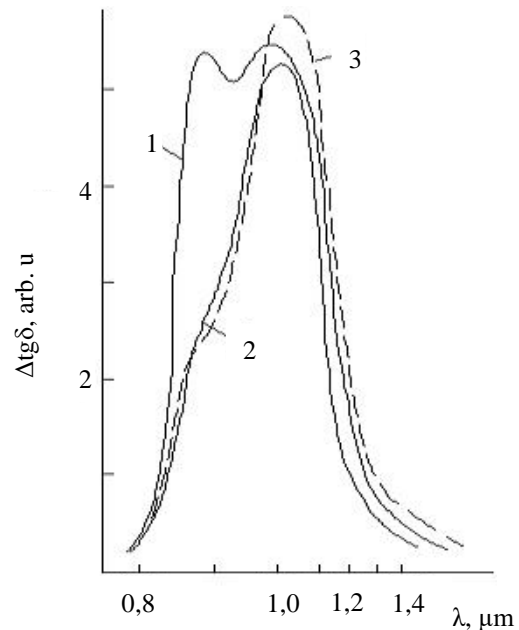


Рис. 2. Спектральний розподіл тангенса кута діелектричних втрат у кристалах  $Cd_{1-x}Zn_xTe$ , поверхня яких була послідовно піддана хімічному травленню (1), поліруванню (2) і шліфуванню (3)

під дією механічної обробки підтверджують результати вимірювань, наведені у таблиці 1. З неї видно, що внаслідок полірування та шліфування поверхні трансформується спектр енергій фотоіонізації локалізованих станів носіїв заряду в приповерхневому шарі кристалів ZnSe. Про наявність такої зміни спектра енергій фотоіонізації також свідчать результати вимірів координатних залежностей діелектричних параметрів системи електроди – зразок  $Cd_{1-x}Zn_xTe$ . При виконанні цього дослідження обидві поверхні зразка були отримані сколюванням, але далі одна з них піддавалась механічній поліровці та шліфовці, а інша залишалась незмінною (рис. 3). Збільшення  $C$  і  $tg\delta$  внаслідок шліфування (див. рис. 3, а та рис. 3, б, криві 2) може бути пояснено появою додаткових поверхневих електрично активних дефектів структури. При подальшому поліруванні поверхні зразка, вочевидь, певна частина електрично активних поверхневих дефектів нейтралізується. Цим можна пояснити подальше зменшення діелектричних параметрів системи електроди-зразок після полірування (див. рис. 3, а та рис. 3, б, криві 3).

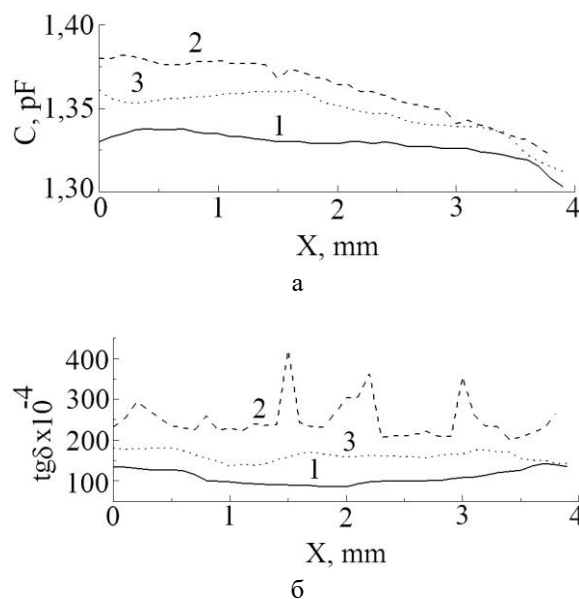


Рис. 3. Координатні залежності електроємності (а) і тангенса кута діелектричних втрат (б) системи електроди-зразок  $Cd_{1-x}Zn_xTe$ . Поверхня зразка отримана сколюванням (1), шліфуванням (2), поліруванням (3).  $f = 10$  кГц.

Таблиця 1

Енергії фотоіонізації локалізованих станів носіїв в кристалах ZnSe, підданих різним видам механічної обробки

Скол	Полірування	Шліфування
$E_i, eV$	$E_i, eV$	$E_i, eV$
-0,11		
-0,09		
	-0,08	
		-0,07
	-0,05	
-0,04		
		-0,01
0,02		
	0,04	
		0,16
	0,18	
0,22		0,22
	0,23	
		0,27
	0,32	
		0,34
	0,37	
0,40		
		0,42
	0,43	
		0,46
0,47		
	0,48	

### 2.2. Вплив локального деформування на електрофізичні властивості кристалів $Cd_{1-x}Zn_xTe$

На рис. 4 показано поверхню зразка  $Cd_{1-x}Zn_xTe$ , що була піддана локальному навантаженню індентором у дев'яти областях. Стрілку на рисунку проведено вздовж напрямку переміщення рухомого електроду при вимірюванні діелектричних параметрів системи електроди-зразок. Координатні залежності електроємності  $C$  і тангенса кута діелектричних втрат  $tg\delta$  системи електроди – зразок, були виміряні у вказаному напрямку (рис. 5).

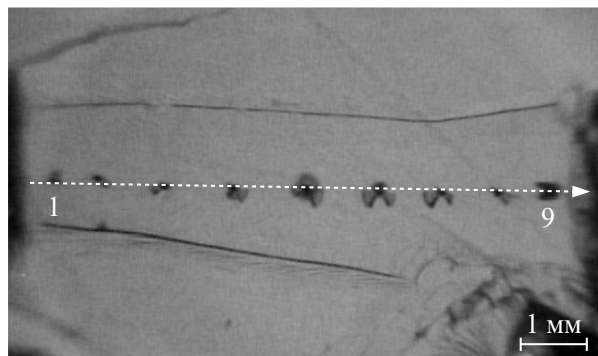


Рис. 4. Зображення зразка  $Cd_{1-x}Zn_xTe$  у прохідному ІЧ-випромінюванні. Цифри – номери областей деформування

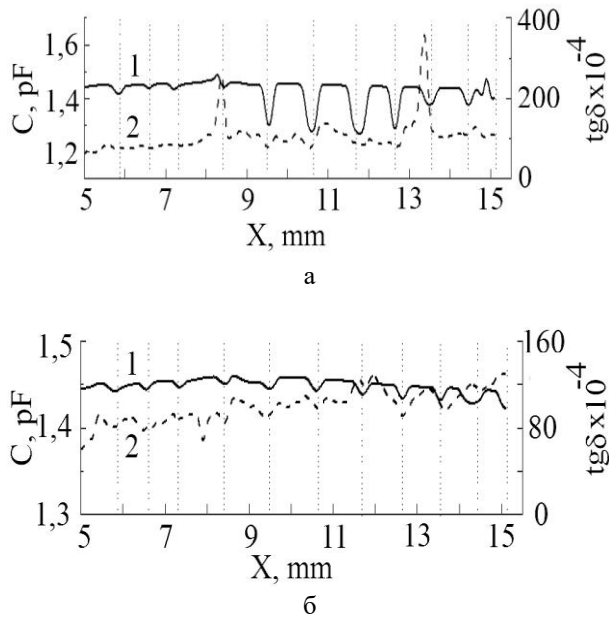


Рис. 5. Координатні залежності електроємності  $C$  (1) і тангенса кута діелектричних втрат  $\text{tg}\delta$  (2) для системи електроди – зразок  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ , виміряні після механічного навантаження (а) і через добу (б).  $f = 10$  кГц

Як видно з рис. 4, різні форми відбитків, картини тріщин та подвійного променезаломлення свідчать про суттєву відмінність характеристик локального пластичного деформування в областях 1–9. Це відбивається й на координатних залежностях  $C$  і  $\text{tg}\delta$  системи електроди – зразок. Суттєво, що через добу (див. рис. 5, б) на координатних залежностях діелектричних параметрів системи електроди-зразок вже майже непомітний вплив локального механічного навантаження. Це свідчить про спонтанну релаксацію залишкових механічних напружень і відповідної системи дефектів.

Отже, утворені при локальному навантаженні дефекти структури чинять значний вплив на діелектричні параметри напівпровідникових кристалів  $\text{ZnSe}$  та  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ . Релаксація такої системи дефектів супроводжується відповідними змінами вказаних параметрів кристалів.

## Висновки

Встановлено, що механічна обробка шліфуванням та поліруванням кристалів  $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{VI}}$  складу  $\text{ZnSe}$  і  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$  спричиняє трансформацію власного і домішкового максимумів спектральних залежностей  $\Delta\varepsilon'_{\text{ef}}$  і  $\Delta\text{tg}\delta$ , що може бути пояснено зміною швидкості рекомбінації носіїв заряду, а

також трансформацією дефектної структури у приповерхневій зоні. На користь останнього свідчать результати вимірів енергії фотоіонізації локалізованих станів носіїв в кристалах  $\text{ZnSe}$  та координатних залежностей діелектричних параметрів системи електроди – зразок  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ . Так, шліфування отриманої сколюванням поверхні зразка збільшує, а подальше полірування зменшує кількість електрично активних дефектів структури в цій області.

Показано істотний вплив локального деформування зразка  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$  на його діелектричні параметри. Внаслідок релаксації відповідної дефектної структури і пов'язаних з нею пружних полів змінюються діелектричні параметри деформованих областей.

Одержані результати важливі з огляду як контролю якості механічної обробки кристалів, що використовуються в аерокосмічній техніці, так і прогнозуванню змін їх діелектричних та фотоелектричних властивостей внаслідок метеорної ерозії.

## Література

1. Hussain, A. An experimental study on effect of dust on power loss in solar photovoltaic module [Text] / A. Hussain, A. Batra, R. Pachauri // *Renewables: Wind, Water, and Solar*. – 2017. – Volume 4. Article No. 9. DOI: 10.1186/s40807-017-0043-y.
2. Study of Micrometeoroid and Orbital Debris Effects on the Solar Panels Retrieved from the Space Station “MIR” [Text] / V. Smirnov, A. Semenov, V. Sokolov et al. // *Space Debris*. – 2000. – Vol. 2. – P. 1-7. DOI: 10.1023/A:1015607813420.
3. Гременок, В. Ф. Солнечные элементы на основе полупроводниковых материалов [Текст] / В. Ф. Гременок, М. С. Тиванов, В. Б. Залесский // *Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология»*. – 2009. – № 1 (69). – С. 59-124.
4. Бардин, А. Н. Технология оптического стекла [Текст] / А. Н. Бардин. – Москва : Высшая школа, 1963. – 519 с.
5. Пат. на корисну модель № u2012 08435 Україна, МПК (2012) G01N 13/00. Спосіб визначення фотоактивних центрів в кристалічних матеріалах / Чугай О. М., Абашин С. Л., Герасименко А. С. та ін.; заявник й патентовласник Нац. аерокосм. ун-т ім. М. С. Жуковського „Харк. авіац. ін-т”. – № u2012 08435 ; заявл. 09.07.2012 ; опубліковано 10.04.2013, бюл. № 7/2013. – 4 с. : іл.
6. Влияние структуры и механических свойств приповерхностного слоя монокристалла

ниобата лития на процесс производства интегрально-оптических схем [Текст] / А. В. Сосунов, Р. С. Пономарев, В. А. Юрьев, А. Б. Волинцев // АВТОМЕТРИЯ. – 2017. – Т. 53, № 1. – С. 100-106.

7. Обработка поверхности заготовок для изготовления CdZnTe-детекторов [Текст] / О. А. Федоренко, Н. Г. Дубина, В. А. Христьян, И. С. Терзин // Физика и техника полупроводников. – 2011. – Т. 45, № 8. – С. 1126-1129.

## References

1. Hussain, A., Batra, A., Pachauri, R. An experimental study on effect of dust on power loss in solar photovoltaic module. *Renewables*, 2017, vol. 4, article number 9. DOI: 10.1186/s40807-017-0043-y.

2. Smirnov, V., Semenov, A., Sokolov, V., Konoshenko, V., Kovalyov, I. Study of Micrometeoroid and Orbital Debris Effects on the Solar Panels Retrieved from the Space Station "MIR". *Space Debris*, 2000, vol. 2, pp. 1-7. DOI: 10.1023/A:1015607813420.

3. Hremenok, V. F., Tyvanov, M. S., Zalesskyu, V. B. Solnechnie elementy na osnove poluprovodnykovikh materyalov [Solar cells based on semiconductor materials] *Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal «Al'ternatyvnaya enerhetyka y ekolohyya»* –

*International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology*, 2009, no. 1 (69), pp. 59 – 124.

4. Bardyn, A. N. Tekhnolohyya opticheskogo stekla [Optical glass technology]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1963. 519 p.

5. Chugai, O. M., Abashyn, S. L., Herasymenko, A. S., Komar, V. K., Novokhats'ka, T. M., Poluboyarov, O. O., Oliynyk, S. V., Sulyma, S. V. *Sposib vyznachennyya fotoaktyvnykh tsestriv v krystalichnykh materialakh* [Method of determining photoactive centers in crystalline materials]. Patent na korysnu model' Ukrayina, no. u2012 08435, 2013.

6. Sosunov, A. V., Ponomarev, R. S., Yur'ev, V. A., Volyntsev, A. B. Effect of the structure and mechanical properties of the near-surface layer of lithium niobate single crystals on the manufacture of integrated optic circuits. *Optoelectronics, instrumentation and data processing*, 2017, vol. 53, no. 1, pp. 82-87.

7. Fedorenko, O. A., Dubyna, N. H., Khryst'yan, V. A., Terzyn, Y. S. Obrabotka poverkhnosty zahotokov dlya yzhotovlenyya CdZnTe-detektorov [Surface treatment of workpieces for the manufacture of CdZnTe detectors]. *Fyzyka y tekhnika poluprovodnykov*, 2011, vol. 45, no. 8, pp. 1126-1129.

Надійшла до редакції 12.04.2021, розглянута на редколегії 20.05.2021

## ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ФОТОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ А<sup>II</sup>В<sup>VI</sup>

О. Н. Чугай, С. Л. Абашиш, С. В. Олейник, И. В. Лунёв

**Предметом** изучения в работе являются диэлектрические и фотодиэлектрические свойства кристаллов А<sup>II</sup>В<sup>VI</sup> состава ZnSe и Cd<sub>1-x</sub>Zn<sub>x</sub>Te, выращенных из расплава, и связанные с этими свойствами структурные дефекты и внутренние упругие поля. **Целью** статьи является исследование закономерностей влияния механической обработки поверхности путем шлифовки, полировки и локального нагружения на дефектную структуру в области деформирования, а, значит, и на диэлектрические и фотодиэлектрические свойства кристаллов А<sup>II</sup>В<sup>VI</sup> указанного состава, что важно с точки зрения применения данных кристаллов в аэрокосмической технике. **Задачи:** исследовать закономерности влияния шлифовки, полировки и локального деформирования полученной скалыванием поверхности образцов ZnSe и Cd<sub>1-x</sub>Zn<sub>x</sub>Te на их дефектную структуру, диэлектрические и фотодиэлектрические свойства, включая необратимые изменения свойств. Задачи решались следующими **методами:** емкостным методом исследовали диэлектрические и фотодиэлектрические свойства кристаллов; методом сканирующей фотодиэлектрической спектроскопии измеряли энергию фотоионизации локализованных состояний носителей зарядов в кристаллах; поляризационно-оптическим методом изучалось распределение остаточных упругих напряжений в образцах. Получены следующие **результаты.** Шлифовка и полировка вызывает трансформацию собственного и примесного максимумов спектральных зависимостей диэлектрических параметров кристаллов А<sup>II</sup>В<sup>VI</sup>, оказывает характерное влияние на координатные зависимости диэлектрических параметров кристаллов Cd<sub>1-x</sub>Zn<sub>x</sub>Te. Это обусловлено трансформацией локализованных состояний носителей, что подтверждено исследованием кристаллов ZnSe. Локальное деформирования кристаллов Cd<sub>1-x</sub>Zn<sub>x</sub>Te существенно влияет на их диэлектрические свойства, в частности, вызывает релаксацию диэлектрических параметров. **Выводы.** Механическая обработка поверхности кристаллов А<sup>II</sup>В<sup>VI</sup> шлифовкой и полировкой, а также локальное механическое нагружение образцов Cd<sub>1-x</sub>Zn<sub>x</sub>Te существенно влияет на их диэлектрические

и фотодиэлектрические свойства, что связано с образованием системы дефектов и внутренних упругих полей в областях деформирования. Приводится объяснение наблюдаемых эффектов.

**Ключевые слова:** кристаллы  $A^{II}B^{VI}$ ; кристаллы ZnSe; кристаллы  $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ; шлифовка; полировка; сосредоточенное деформирование; диэлектрические свойства; фотодиэлектрические свойства.

## INFLUENCE OF SURFACE MECHANICAL TREATMENT ON DIELECTRIC AND PHOTODIELECTRIC PROPERTIES OF $A^{II}B^{VI}$ CRYSTALS

*O. Chugai, S. Abashin, S. Oliynik, I. Lun'ov*

The **subject matter** of the study is the dielectric and photodielectric properties of  $A^{II}B^{VI}$  crystals of composition ZnSe and  $Cd_{1-x}Zn_xTe$ , which are grown from the melt, and the structural defects and internal elastic fields associated with these properties. The **goal** of the article is to study the patterns of influence of surface machining by grinding, polishing, and local loading on the defective structure in the deformation region, and thus on the dielectric and photodielectric properties of  $A^{II}B^{VI}$  crystals of this composition, which is important given the use of these crystals in aerospace engineering. The **tasks** to be solved are: to investigate the regularities of the influence of grinding, polishing, and local deformation of the chipped surface of ZnSe and  $Cd_{1-x}Zn_xTe$  samples on their defective structure, dielectric and photodielectric properties, including irreversible changes in properties. The problems were solved by the following **methods**: dielectric and photodielectric properties of crystals were investigated by the capacitive method; scanning photodielectric spectroscopy was used to measure the photoionization energies of localized states of charge carriers in crystals; the distribution of residual elastic stresses in the samples was studied by the polarization-optical method. The following **results** were obtained. Grinding and polishing cause the transformation of own and impurity maxima of the spectral dependences of the dielectric parameters of  $A^{II}B^{VI}$  crystals, has a characteristic effect on the coordinate dependences of the dielectric parameters of crystals  $Cd_{1-x}Zn_xTe$ . This is due to the transformation of localized states of carriers, which is confirmed by the study of ZnSe crystals. Concentrated deformation of  $Cd_{1-x}Zn_xTe$  crystals significantly affects their dielectric properties, in particular, causes relaxation of dielectric parameters. **Conclusions.** Mechanical surface treatment of  $A^{II}B^{VI}$  crystals by grinding and polishing, as well as local mechanical loading of  $Cd_{1-x}Zn_xTe$  samples significantly affect their dielectric and photodielectric properties, which is associated with the formation of a system of defects and internal elastic fields in the deformation regions. An explanation of the observed effects is given.

**Keywords:**  $A^{II}B^{VI}$  crystals; ZnSe crystals;  $Cd_{1-x}Zn_xTe$  crystals; grinding; polishing; concentrated deformation; dielectric properties; photodielectric properties.

**Чугай Олег Миколайович** – д-р техн. наук, професор, професор каф. 505, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

**Абашин Сергій Леонідович** – канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб. лабораторії електронної мікроскопії, оптики та лазерних технологій, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

**Олійник Сергій Володимирович** – канд. техн. наук, доц. каф. 505, Національний аерокосмічний університет ім. М.С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

**Луньов Ігор Валентинович** – канд. техн. наук, доц. каф. 505, Національний аерокосмічний університет ім. М.С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

**Oleg Chugai** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Professor at the Department of 505, National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine,  
e-mail: chugai@xai.edu.ua, ORCID: 0000-0002-2857-6592, Scopus Author ID: 6602397105.

**Sergiy Abashin** – PhD, senior researcher in the laboratory of electron microscopy, optics and laser technology, National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine,  
e-mail: s.abashin@khai.edu, ORCID: 0000-0002-5585-9256, Scopus Author ID: 8722774400.

**Sergiy Oliynik** – PhD, Associate Professor of Department of 505, National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine,  
e-mail: oleynick1981@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6073-8531, Scopus Author ID: 8404643500.

**Ihor Lun'ov** – PhD, Associate Professor of Department of 505, National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine,  
e-mail: igor.lunev@khai.edu, ORCID: 0000-0001-9286-5981, Scopus Author ID: 57218601928.