

# ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ЕЛЕКТРИЧНОГО ОПОРУ ВІД ТИСКУ КРИСТАЛІВ $Sn_2P_2S_6$ В ДІАМАНТОВІЙ КАМЕРІ

Ю.І. Тягур<sup>1</sup>, В.В. Щенніков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ужгородський національний університет  
вул. Підгірна, 46, Ужгород 88000, Україна

<sup>2</sup>Институт физики металлов Уральского отделения Российской академии наук  
620041 Екатеринбург, Россия

Проведені виміри залежностей електричного опору від тиску до 3.5 ГПа в діамантовій камері на кристаликах  $Sn_2P_2S_6$  при кімнатній температурі. Встановлено, що  $R(p)$  зменшується з тиском. Запропоновані рівняння, якими можна описати залежності  $R(p)$ ,  $\alpha_T(p)$ ,  $E_{gR}(T, p)$  від тиску для  $Sn_2P_2S_6$ . Методом апроксимації, визначені параметри рівнянь та проведено їх аналіз. Виявлені аномалії в баричних залежностях електричного опору, які інтерпретовані, як новий структурний фазовий перехід під тиском в  $Sn_2P_2S_6$  при  $p \approx 3 \text{ GPa}$ .

## Вступ

Кристали тіогіподифосфату олова ( $Sn_2P_2S_6$ ) є представниками групи  $A_2^{IV} B_2^V C_6^{VI}$  [1-14]. Технологія і деякі хімічні, фізичні, кристалографічні властивості цих кристалів вперше описані в працях [1-7]. В кристалах  $Sn_2P_2S_6$  яскраво виражені фотоелектричні, сегнетоелектричні і напівпровідникові властивості [7-14]. При температурі  $T_0 = (339 + -3) \text{ K}$  і атмосферному тиску в кристалах відбувається сегнетоелектричний фазовий перехід (СЕФП) [5, 15]. При збільшенні високого гідростатичного тиску, прикладеного до зразка, температура СЕФП зменшується [14-18].

Дослідження впливу високого тиску до 0.6 ГПа на електричну провідність [14], електричний опір  $R(p)$  представлено в працях [19-23]. Встановлені співвідношення залежності  $R(p)$  і показано, що в точці СЕФП  $R(p)$  проявляє чітку аномалію. З аналізу р-Т діаграми  $Sn_2P_2S_6$  [15-18] випливає, що при високих тисках в  $Sn_2P_2S_6$ , може реалізуватися новий структурний фазовий перехід.

Дана робота присвячена дослід-

женню  $R(p)$  і пошуку нових фазових переходів в  $Sn_2P_2S_6$ . Дослідження проводилися в алмазній камері при кімнатній температурі до тисків 3.5 ГПа на маленьких природних (неорієнтованих) кристаликах  $Sn_2P_2S_6$ . Вимірювання проводилися при збільшенні і зменшенні тиску. Техніка і методика експерименту описані в працях [23-25]. Точність вимірювання високого тиску в алмазній камері в застосованому інтервалі тисків складає (0.2-0.3) ГПа.

## 1. Теоретична частина

З фізики напівпровідників відомо, що залежність електричного опору від тиску  $R(p)$  при фіксованій температурі для елемента зразка може бути виражена співвідношенням:

$$R(p) = \frac{\ell}{S} \cdot \rho(p) = \frac{\ell}{S} \cdot \frac{1}{\sigma(p)} = \frac{\ell}{S} \cdot \frac{1}{e \cdot n(p) \cdot \mu(p)} \quad (1)$$

де  $\ell$  - довжина,  $S$  - площа,  $\rho$  - питомий електричний опір,  $\sigma$  - питома електрична провідність,  $e$  - заряд електрона,  $n$  - концентрація,  $\mu$  - рухливість вільних

носіїв заряду. В роботах [20, 21] було показано, що енергетичну функцію  $E_{gR}(T, p)$ , яка характеризує загальну зміну функцій, ширини забороненої зони  $E_g(T, p)$ , ефективної маси  $m^*(p)$ , часу релаксації  $\tau(p)$  носіїв заряду з тиском можна виразити рівнянням:

$$E_{gR}(T, p) = 2kT \cdot \ln\left(\frac{R(p)}{R_0}\right) + E_g(T, 0) = \\ = E_g(T, p) + 2kT \cdot \ln(1 + \delta \cdot p) - \\ - 2kT \cdot \ln(1 + \xi \cdot p) \quad (2)$$

де  $E_g(T, 0)$  - температурна залежність ширини забороненої зони при тиску рівному нуль ГПа,  $\delta$  - відносний тисковий коефіцієнт ефективної маси,  $\xi$  - відносний тисковий коефіцієнт часу релаксації. При умові, що ефективна маса, час релаксації носіїв заряду з тиском не змінюються ( $\delta = 0, \xi = 0$ ), функція  $E_{gR}(T, p)$  описує зміну ширини забороненої зони з тиском, тобто  $E_g(T, p)$ . Раніше [20-23], також було показано, що залежність  $R(p)$  (1) можна представити експоненціальним рівнянням вигляду:

$$R(p) = R_0 \cdot \\ \cdot \exp(D_0 + D_1 \cdot p + D_2 \cdot p^2 + D_3 \cdot p^3) \quad (3)$$

де  $D_0, D_1, D_2, D_3$  - параметри. Рівняння (3) може бути застосовано для описання залежності  $R(p)$  в сегнетоелектричній і параелектричній фазі.

### Розглянемо деякі окремі випадки залежності $R(p)$ (3)

Так, наприклад, якщо залежність відносного баричного коефіцієнту електричного опору  $\alpha_T(p)$  від тиску, в сегнетоелектричній фазі не змінюється і його значення рівне константі, тобто  $\alpha_T(p) = D_1$ , то залежність  $R(p)$  в цій фазі описується рівнянням:

$$R(p) = R_0 \cdot \exp(D_1 \cdot p) \approx R_0(1 + D_1 \cdot p). \quad (4)$$

Якщо залежність відносного

баричного коефіцієнту електричного опору  $\alpha_T(p)$  від тиску, описується лінійним співвідношенням,  $\alpha_T(p) = D_1 + 2 \cdot D_2 \cdot p$ , то залежність  $R(p)$  в цій фазі описується рівнянням:

$$R(p) = R_0 \cdot \exp(D_1 \cdot p + D_2 \cdot p^2). \quad (5)$$

Якщо залежність  $\alpha_T(p)$  нелінійна і її можна представити квадратичною функцією

$\alpha_T(p) = D_1 + 2 \cdot D_2 \cdot p + 3 \cdot D_3 \cdot p^2$ , то залежність  $R(p)$  має вигляд:

$$R(p) = R_0 \cdot \exp(D_1 \cdot p + D_2 \cdot p^2 + D_3 \cdot p^3) \quad (6)$$

Якщо залежність  $\alpha_T(p)$  нелінійна, але її можна зобразити лінійною в координатах десяткового логарифма,  $\alpha_T(p) = P2 + P3 \cdot \log(p)$ , то залежність  $R(p)$  описується експоненціальною функцією:

$$R(p) = P1 \cdot \\ \cdot \exp[(P2 - 0.4343 \cdot P3) \cdot p + P3 \cdot p \cdot \log(p)] \quad (7)$$

де  $P1 = R_{01}, P2, P3$  - параметри рівняння.

Відомо, що в тій чи іншій фазі,  $\alpha_T(p)$  може порізно залежати від тиску. Тоді, аномалії, які виникають в залежності  $\alpha_T(p)$  можуть свідчити про границю фази, тобто про фазовий перехід.

Якщо обернена величина  $(\alpha_T(p))^{-1}$ , в околі точки СЕФП має лінійну залежність в сегнетоелектричній і параелектричній фазі, то з цього випливає, що  $R(p)$ , може бути описана степеневими рівняннями [23]:

$$R(p)_{fe} = R_{01} \cdot \left(1 - \frac{p}{p_{01}}\right)^{N_1} \quad (8)$$

$$R(p)_{pa} = R_{02} \cdot \left(\frac{p}{p_{02}} - 1\right)^{N_2}, \quad (9)$$

для сегнетоелектричної і параелектричної фаз.

## 2. Експериментальна частина

На рис. 1 зображено залежність

електричного опору від тиску  $R(p)$  в режимі циклювання високим тиском до 3.5 ГПа кристаліка  $Sn_2P_2S_6$ . З рис. 1 видно, що під дією високого тиску електричний опір зменшується. Поблизу тиску 3 ГПа, на кривій 1 виявлене круте зменшення електричного опору, мабуть зв'язане з новим фазовим переходом під тиском в  $Sn_2P_2S_6$ . Як видно з рисунку нова фаза при  $p \geq 3 \text{ GPa}$ , має опір на 2 порядки менший ніж стартовий опір вимірювання при малих тисках. Циклювання тиском показало, що, мабуть, частина низькоомної фази залишається в зразку при зменшенні тиску до малих значень. Це, в результаті приводить до зміни характеру залежності  $R(p)$  на ділянці застосованих тисків. Криві 2, 3, 4 на рис. 1, можна задовільно апроксимувати лінійними залежностями, рівняння яких приведені на рисунку. Аномалія виявлена при першому вимірі  $R(p)$  у вигляді перетину двох лінійних залежностей 1a і 1b, має місце і при наступних вимірах 2, 3, 4, але її проявлення не є таким яскравим (див. рис. 1, стрілки). Опір стартової фази, при циклюванні задовільно відновлюється до свого попереднього значення. Слід очікувати, що багаторазове циклювання тиском  $Sn_2P_2S_6$ , призведе до нового характеру поведінки  $R(p)$  з метастабільним коефіцієнтом нахилу кривої  $R(p)$ .

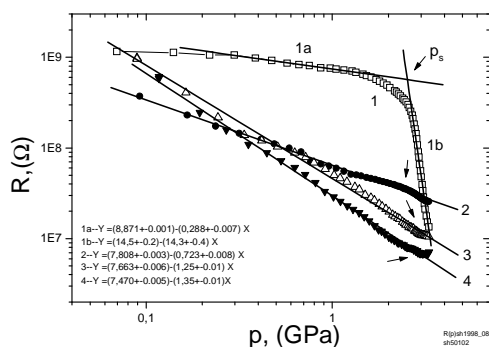


Рис. 1. Залежність електричного опору  $R$  від тиску  $p$  для кристаліка  $Sn_2P_2S_6$  при  $T \approx 298 \text{ K}$  в масштабі подвійного десяткового логарифма в режимі циклювання високим тиском в алмазній камері: криві 1, 2, 3, 4, відповідають вимірюванням 1, 2, 3, 4 при зростанні тиску.

На рис. 2 приведено залежності відносного баричного коефіцієнту електричного опору  $\alpha_T(p)$  і його оберненої величини  $(\alpha_T(p))^{-1}$  від тиску для 1, 2, 3, 4 вимірювання залежностей  $R(p)$ . З рис. 2А видно, що для аналізу залежності  $\alpha_T(p)$  на ділянці застосованих тисків, її можна розділити на декілька ділянок. Так, ділянка 1, характеризує сегнетоелектричну фазу (fe), в якій  $\alpha_T(p)$  зменшується до значення тиску сегнетоелектричного фазового переходу  $p_1 \approx 0.17 \text{ GPa}$ . Ділянка 2, характеризує параелектричну фазу (ра 1), яка лежить поряд з точкою СЕФП і для цієї ділянки коефіцієнт  $\alpha_T(p)$  майже лінійно збільшується до тисків  $p_2 \approx 1 \text{ GPa}$ . Ця фаза є якась проміжна і має ту особливість, що  $\alpha_T(p)$  зростає. Далі на ділянці 3, яку назвемо параелектрична фаза 2 (ра 2), яка є порівняно далеко від точки СЕФП,  $\alpha_T(p)$  знову майже лінійно зменшується до тисків  $p_3 \approx 2.5 \text{ GPa}$ , а далі на ділянці 4,  $\alpha_T(p)$  круто зменшується до тисків  $p_4 \approx 3 \text{ GPa}$ , утворюючи мінімум в залежності  $\alpha_T(p)$ . На ділянці 5,  $\alpha_T(p)$ , знову майже лінійно зростає.

Коефіцієнти лінійного рівняння  $\alpha_T(p) = D_1 + 2 \cdot D_2 \cdot p$  для розглянутих ділянок приведені в таблиці 1. З таблиці 1 видно, що відношення коефіцієнтів нахилу ліній  $\alpha_T(p)$  з ділянки 1 до ділянки 2 дає значення приблизно рівне мінус одиниці. Відношення коефіцієнтів нахилу з ділянки 1 до ділянки 3 дає значення приблизно рівне двом, а відношення коефіцієнтів нахилу з ділянки 2 до ділянки 3 дає значення приблизно рівне мінус двом. Цікавим є те, що відношення коефіцієнтів нахилу з ділянки 4 до ділянки 5 дає значення приблизно рівне мінус одиниці. Таким чином, ділянка 2 і ділянка 5, мабуть характеризують одну і ту саму фазу (проміжну) [16, 17].

При наступних вимірах 2, 3, 4, рис. 2 В, С, Д, в залежностях  $\alpha_T(p)$  при тисках приблизно 0.7 ГПа, 1.4 ГПа і 3 ГПа, також спостерігаються аномалії, але не дуже яскраво виражені.

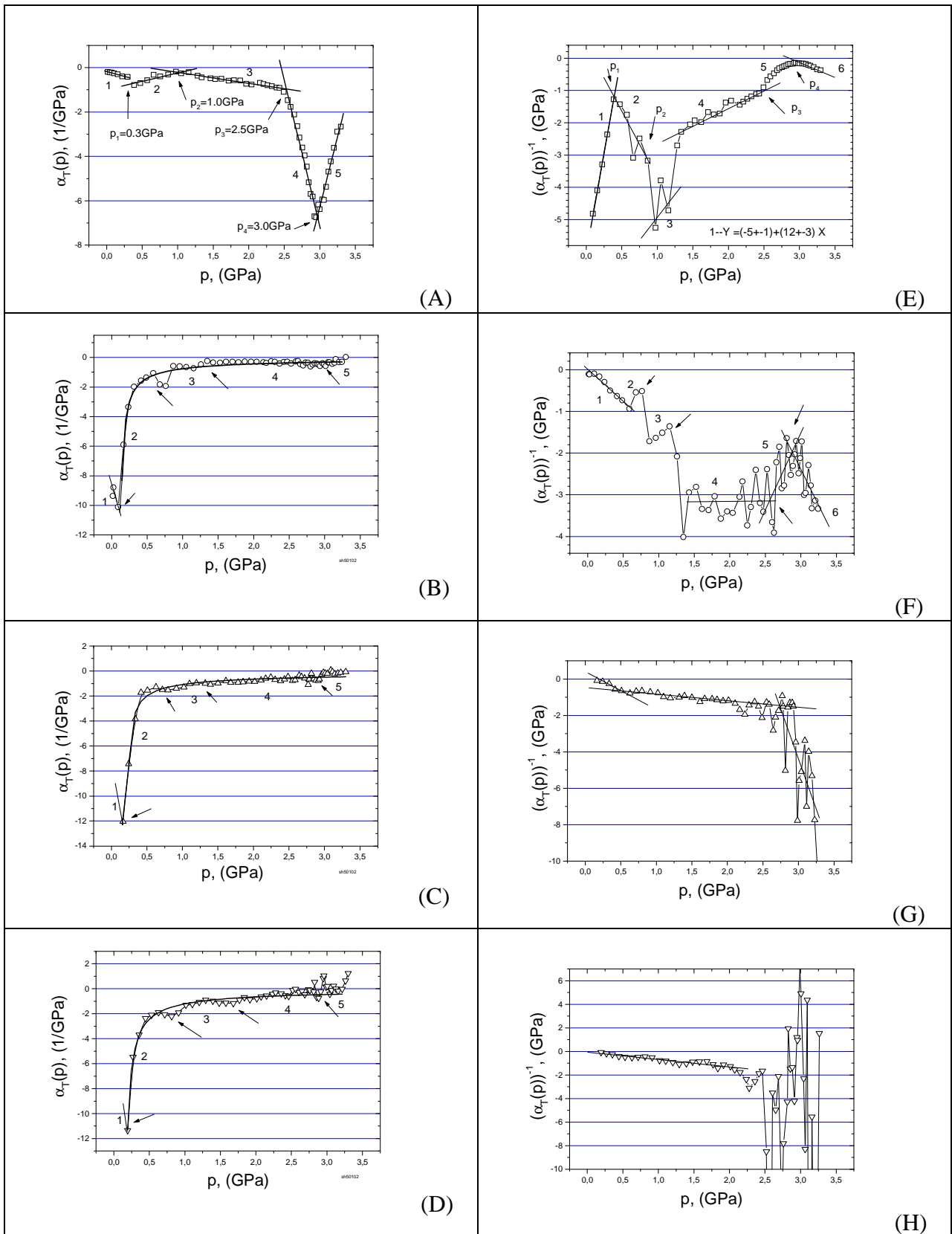


Рис. 2. Залежність відносного баричного коефіцієнту електричного опору  $\alpha_T(p)$  і його оберненої величини  $(\alpha_T(p))^{-1}$  від тиску при  $T \approx 298\text{K}$  для кристалика  $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$  в режимі чотирьох вимірів при збільшенні тиску:  $\alpha_T(p)$  ----рис. 2А, В, С, D;  $(\alpha_T(p))^{-1}$  ---- рис.2Е, F, G, H, - вимірювання  $R(p)$  №1, №2, №3, №4, відповідно.

На рис. 2Е, F, G, H, приведені залежності оберненого відносного коефіцієнта  $(\alpha_T(p))^{-1}$  від тиску. З рис. 2Е, крива 1 і 2, видно, що в сегнетоелектричній фазі і параелектричній фазі залежність  $(\alpha_T(p))^{-1}$  є лінійною. Це означає, що на цих ділянках залежність  $R(p)$ , може бути описана степеневими рівняннями (8 і 9). З рівняння (8) та вимірювання витікає, що для сегнетоелектричної фази для першого виміру залежність відносного коефіцієнта  $\alpha_T(p)$  задовільно описується рівнянням

$$(\alpha_T(p))_{fe} = \left( \frac{-N_1}{p_{01}} \right) \cdot \left( 1 - \frac{p}{p_{01}} \right)^{-1} = (-0.19 \pm 0.02) \cdot \left( 1 - \frac{p}{0.4} \right)^{-1} \quad (10)$$

При наступних вимірах, стартовий тиск був більшим за тиск СЕФП, і тому в сегнетоелектричній фазі вимірювання  $R(p)$  майже не відбувалося.

### Аналіз залежності $(\alpha_T(p))^{-1}$ поблизу фазового переходу в параелектричній фазі

З рис. 2Е, кривої 2 видно, що залежність  $(\alpha_T(p))^{-1}$  є лінійною для 1 виміру. Для вимірів 2, 3, 4, бачимо, що лінійна ділянка залежності  $(\alpha_T(p))^{-1}$ , розширюється (рис. 2Е, F, G, H). З рівняння (9), знаходимо залежність  $\alpha_T(p)$  і вона має наступний вигляд

$$(\alpha_T(p))_{pa} = S1 \cdot \left( \frac{p}{S2} - 1 \right)^{S3} = \left( \frac{N_2}{p_{02}} \right) \cdot \left( \frac{p}{p_{02}} - 1 \right)^{-1} \quad (11)$$

Таблиця 1

**Значення коефіцієнтів лінійного рівняння  $\alpha_T(p) = D_1 + 2 \cdot D_2 \cdot p$  для ділянок 1, 2, 3, 4, 5, рис 2А**

	1-line (fe)	2-line (pa1)	3-line	4-line	5-line
$D_1, \left( \frac{1}{GPa} \right)$	$(-0.18 \pm 0.01)$	$(-1.1 \pm 0.1)$	$0.28 \pm 0.05$	$32 \pm 2$	$(-44 \pm 2)$
$2 \cdot D_2, \left( \frac{1}{(GPa)^2} \right)$	$(-0.9 \pm 0.1)$	$1.0 \pm 0.1$	$(-0.49 \pm 0.03)$	$(-13.2 \pm 0.7)$	$12.6 \pm 0.7$

Таблиця 2

**Значення коефіцієнтів степеневого рівняння  $\alpha_T(p) = S1 \cdot \left( \frac{p}{S2} - 1 \right)^{S3} = \left( \frac{N_2}{p_{02}} \right) \cdot \left( \frac{p}{p_{02}} - 1 \right)^{-1}$  в параелектричній фазі, для 1, 2, 3, 4, вимірювання, рис 2В, С, D, суцільні лінії**

	1-вимір	2-вимір	3-вимір	4-вимір
$S1 = \frac{N_2}{p_{02}}, \left( \frac{1}{GPa} \right)$	$(-2.4 \pm 0.1)$	$(-5.2 \pm 2.6)$	$(-2.3 \pm 0.4)$	$(-2.9 \pm 0.7)$
$S2 = p_{02}, (GPa)$	$0.10 \pm 0.01$	$0.09 \pm 0.02$	$0.21 \pm 0.02$	$0.21 \pm 0.04$
$S3 = -1$	$(-1.0 \pm 0.1)$	$(-0.9 \pm 0.2)$	$(-0.6 \pm 0.2)$	$(-0.5 \pm 0.1)$
$N_2$	$(-0.24 \pm 0.01)$	$(-0.47 \pm 0.02)$	$(-0.48 \pm 0.02)$	$(-0.61 \pm 0.02)$

Параметри рівняння (11) розраховані методом апроксимації з експериментальних результатів і занесені в таблицю 2. З рівняння (9) витікає, що параметр  $S_3$  в рівнянні (11) має бути рівним мінус одиниці. Аналіз результатів приведених в таблиці 2, свідчить, що він зменшується з величини рівної мінус одиниця до значення рівного  $-(-0.5)$ . Таким чином, якщо вважати, що параметр  $S_3$  є аналогічний  $\gamma_{kr}$  критичному, який описує діелектричну проникність і характеризує фазовий перехід, то бачимо що циклювання тиском до 3.5 ГПа змінює цей параметр.

### Аналіз енергетичної залежності

$$E_{gR}(T, p) \quad (2)$$

На рис. 3, зображено залежність функції  $E_{gR}(T, p)$  від тиску при фіксованій температурі. Ця залежність розрахована з експериментальних результатів  $R(p)$  для першого вимірювання (рис. 1, кр. 1).

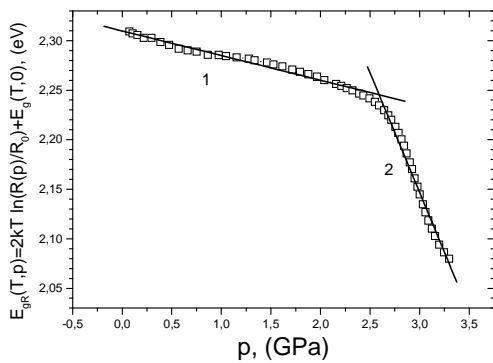


Рис. 3. Залежність енергетичної функції  $E_{gR}(T, p)$  від тиску для кристаліка  $Sn_2P_2S_6$  при фіксованій температурі  $T \approx 298 K$ .

З рис. 3 видно, що сегнетоелектрична фаза при малих тисках на кривій  $E_{gR}(T, p)$  чітко не виділяється. Це пов'язано з методикою досліджень. З рис. 3 видно, що залежність  $E_{gR}(T, p)$  зменшується при зростанні тиску. На кривій  $E_{gR}(T, p)$  можна виділити дві приблизно лінійні ділянки, які описуються рівняннями виду

$$(E_{gR}(T, p))_1 = (2.310 \pm 0.001) - (0.025 \pm 0.001) \cdot p \quad (12)$$

$$(E_{gR}(T, p))_2 = (2.871 \pm 0.022) - (0.241 \pm 0.007) \cdot p \quad (13)$$

Знайдені лінії перетинаються біля тиску 2.6 ГПа. З рівнянь видно, що нахил лінії 2, при тиску більше 2.6 ГПа, майже в 10 раз є більшим, за нахил лінії 1 при тиску менше 2.6 ГПа. Відмітимо, що експериментальні точки (відкриті квадрати) не зовсім сидять на лінії 1, особливо на ділянці (0.7-1.4) ГПа. Частина ділянки кривої 1 згідно  $p$ - $T$  діаграми, мабуть належить проміжній параелектричній фазі. З оптичних досліджень відомо, що для параелектричної фази баричний коефіцієнт ширини забороненої зони приблизно рівний  $\frac{dE_g}{dp} = -(0.05 \div 0.09) \frac{eV}{GPa}$  [14, 17]. Таким чином, знайдений коефіцієнт в рівнянні 1  $(-0.025) \frac{eV}{GPa}$  є в два рази меншим коефіцієнта  $-(0.05) \frac{eV}{GPa}$ , і свідчить, що

$R(p)$  визначають залежності ширини забороненої зони, ефективної маси і часу релаксації носіїв заряду від тиску. Круте зменшення  $E_{gR}(T, p)$  на ділянці 2 при тиску більше 2.6 ГПа, може свідчити про новий фазовий перехід та нову фазу в  $Sn_2P_2S_6$  при високому тиску.

### Аналіз відносних коефіцієнтів $\delta$ і $\xi$ (2)

Розглянемо вклад ефективної маси і часу релаксації носіїв заряду в  $R(p)$ . Для цього розрахуємо відносні коефіцієнти  $\delta$  і  $\xi$  і визначимо їх вклад. В рівнянні (2) лінійний член під натуральним логарифмом розкладемо в ряд і візьмемо перші два члени ряду. Після перетворень і перепозначень, отримаємо рівняння, яке має вигляд:

$$E_{gR}(p, T) = A_0 + A_1 \cdot p + A_2 \cdot p^2, \quad (14)$$

де

$$A_0 = E_{g00},$$

$$A_1 = (-E_{g00} \cdot \beta + 2 \cdot k \cdot T \cdot \delta - 2 \cdot k \cdot T \cdot \xi),$$

$$A_2 = (-k \cdot T \cdot \delta^2 - k \cdot T \cdot \xi^2),$$

В знайденому виразі,  $E_{g00}$  - ширина забороненої зони при нуль ГПа (значення тиску приблизно рівне атмосферному),  $\beta$  - відносний лінійний тисковий коефіцієнт ширини забороненої зони. З приведенного виразу запишемо зв'язок для  $\delta$  і  $\xi$  через коефіцієнти  $A_0, A_1, A_2$ . Він є рівним

$$\frac{(\delta - \xi)}{(\delta^2 + \xi^2)} = \frac{-(A_1 + E_{g00} \cdot \beta)}{2A_2} \quad (15)$$

З рівняння видно, що  $\delta$  і  $\xi$  залежать від коефіцієнтів апроксимації залежності  $E_{gR}(T, p)$  і від коефіцієнта  $\beta$ . Але так як

$$\beta = \frac{1}{E_g} \frac{dE_g}{dp},$$

то для фіксованої темпера-

тури знаки коефіцієнтів  $\delta$  і  $\xi$  визначає коефіцієнт  $\frac{dE_g}{dp}$  і параметри  $A_1, A_2$ .

### Висновки

Представлена теоретична частина і приведені рівняння  $R(p)$ ,  $\alpha_T(p)$ , які дають можливість описати залежності  $R(p)$ ,  $\alpha_T(p)$ , в сегнетоелектричній, параелектричній фазі, та в околі точки СЕФП. Проведені дослідження залежностей  $R(p)$  до 3.5 ГПа. Встановлено, що при збільшенні тиску  $R(p)$  зменшується. Зроблено аналіз залежностей:  $R(p)$ ,  $\alpha_T(p)$ ,  $(\alpha_T(p))^{-1}$ ,  $E_{gR}(T, p)$ . З експериментальних результатів  $R(p)$  визначені параметри рівнянь вказаних залежностей і вони приведені в таблицях. Встановлено, що при тиску приблизно 3 ГПа в  $Sn_2P_2S_6$  реалізується новий структурний фазовий перехід.

### Література

1. Nitsche R., Wild P., Crystal growth of metal-phosphorus-sulfur compounds by vapor transport. - Mat. Res. Bull., 1970, v.5, N6, P. 419-424.
2. Klingen W., Ott R., Hahn H. Uber die Darstellung und Eigenschaften von Hexathio - und Hexaselenohy - podiphosphaten. - Z. anorg. allg. Chem. 1973, b. 396, s. 271-278.
3. Klingen W. Eulenberger G., Hahn H. Uber die kristallstrukturen von  $Fe_2P_2Se_6$  und  $Fe_2P_2S_6$  - Z. anorg. allg. Chem., 1973, b. 401, s. 97-112.
4. Carpentier C.D., Nitsche R. Vapour growth and crystal data of the thio (seleno) - hypodiphosphates  $Sn_2P_2S_6$ ,  $Sn_2P_2Se_6$ ,  $Pb_2P_2S_6$ ,  $Pb_2P_2Se_6$  and their mixed crystals. Mat. Res. Bull., 1974, v. 9, P. 401-410.
5. Carpentier C.D., Nitsche R. Ferroelectricity in  $Sn_2P_2S_6$  - Mat. Res. Bull., 1974, v. 9, P. 1097-1100.
6. Dittmar G., Herbert Schafer. Die Struktur des Di-Zinn-Hexathiohypodiphosphats  $Sn_2P_2S_6$  - Z. Naturforsch., 1974, b. 29b, N5-6, s. 312-317.
7. Nitsche R. Crystal chemistry, growth and properties of multi-cation chalcogenides. - Journal de physique, 1975, v. 36, N 9, P. 3-9 - 3-15.
8. Тягур Ю.И., Фирцак Ю.Ю., Лада Л.В. Реферативно-информационный обзор по материалам  $A_2^{IV}B_2^VC_6^{VI}$  (1957 - 1991 гг.). - Ужгород: ППП "Патент", 1992. - 316 с.
9. Высочанский Ю.М., Сливка В.Ю. Сегнетоэлектрики семейства  $Sn_2P_2S_6$ . Свойства в окрестности точки Лифшица. - Львов: Изд. Закарпаття, 1994. - 264 с.
10. Семак Д.Г., Різак В.М., Різак І.М. Фото-термоструктурні перетворення халькогенідів. Монографія. - Ужгород: Закарпаття, 1999. - 392 с.

11. Різак В.М., Різак І.М., Семак Д.Г. Функціональні халькогенідні напівпровідники. Монографія. – Ужгород: Закарпаття, 2001. – 152 с.
12. Vysochanskii Yu., Yanssen T., Currat R., Folk R., Banys J., Grigas J., Samulionis V. Phase transitions in phosphorus chalcogenide crystals. – Vilnius University Publishing House, Vilnius, 2006. – 453 p.
13. Герзанич О.І. Сегнетоелектрики групи  $A_2^{IV}B_2^VC_6^{VI}$  під впливом високого тиску. – Львів: Видавець Сорока Т.Б., 2008. – 124 с.
14. Тягур Ю.И. Фазовая диаграмма и особенности физических свойств сегнетоэлектрика  $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$  при высоких гидростатических давлениях: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Киев, 1985. – 18 с.
15. Tyagur Y.I. Spontaneous Polarization in  $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$  Ferroelectric Single Crystals, *Ferroelectrics*, v. 345, P.91-101, (2006).
16. Тягур Ю.И., Герзанич Е.И. Фазовая р-Т диаграмма сегнетоэлектрика  $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ . – Кристаллография, том. 29, вып.5, С. 957-962, (1984).
17. Tyagur Y.I., Jun J. The influence of high hydrostatic pressures on phase transitions temperature in ferroelectric crystals of  $(\text{Pb}_y\text{Sn}_{1-y})_2\text{P}_2(\text{Se}_x\text{S}_{1-x})_6$  family. – *Ferroelectrics*, v. 192, P.187-195, (1997).
18. Tyagur Y.I. The peculiarities of ferroelectric p-T phase diagram of  $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$  crystals. - *Ferroelectrics*, v. 211, P. 299-308, (1998).
19. Герзанич Е.И., Бутурлакин А.П., Тягур Ю.И., Гурзан М.И., Чепур Д.В. Исследование полупроводниковых свойств сегнетоэлектрических кристаллов  $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$  вдоль р-Т диаграммы. – Изв. Вузов Физика, 1980, т. 23, № 9, С. 93-96.
20. Тягур Ю.И. Зависимость электрического сопротивления от давления для сегнетоэлектрических кристаллов  $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ . – Науковий вісник Ужгородського ун-ту, Серія Фізика, № 23, С. 141-153, (2008).
21. Tyagur Y., Tyagur I. Effect of Pressure on the Electrical Resistance of  $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$  Semiconductor Ferroelectric Single Crystals, P. 63. Conference Booklet Joint 21<sup>st</sup> AIRAPT and 45<sup>th</sup> EHPRG International Conference on High Pressure Science and Technology. Catania, Italy, September 17-21, 2007.
22. Tyagur Y., Tyagur I. Influence of high pressure on the electrical resistance of  $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$  ferroelectric crystals. – An Int. Journal. High Pressure Research, v. 28, Is. 4, P. 179-185, (2008).
23. Tyagur Y., Tyagur I. Pressure dependences of electrical resistance of  $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$  crystals. Models of R(p) dependences. Conference Booklet, P. 298, XLVIIth EHPRG Conference Paris 2009.
24. Ovsyannikov S.V., Shchennikov V.V. *Appl. Phys. Lett.* 90, 122 103 (2007).
25. Ovsyannikov S.V., Shchennikov V.V. – *J. Phys.: Cond. Matter* 18, L 551 (2006).
26. Shchennikov V.V., Ovsyannikov S.V., Dereveskov S.V., Shchennikov S.V. jr., *J. Phys. Chem. Sol.* 67, 2203 (2006).



# ELECTRICAL RESISTANCE OF $Sn_2P_2S_6$ CRYSTALS UNDER PRESSURE IN DIAMOND ANVIL CELL

Y.I. Tyagur<sup>1</sup>, V.V. Shchennikov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Uzhhorod National University

46 Pidhirna Street, UA-88000 Uzhhorod, Ukraine

<sup>2</sup>High Pressure Group, Institute of Metal Physics of Russian Academy of Sciences  
Urals Division, 18 S. Kovalevskaya Street, GSP-170, Yekaterinburg 620041, Russia

Measurements of the electrical resistance versus pressure up to 3.5 GPa and room temperature are realized for  $Sn_2P_2S_6$  samples in diamond anvil cell. It is established, that electrical resistance decreases with increasing pressure. Equations describing pressure dependences  $R(p)$ ,  $\alpha_T(p)$ ,  $E_{gR}(T, p)$  of  $Sn_2P_2S_6$  are presented. Parameters of presented equations are obtained by approximation method. Discontinuities of pressure dependences of the electrical resistance are observed, which are possibly related to a new structural phase transition under pressure in  $Sn_2P_2S_6$  at  $p \approx 3\text{ GPa}$ .

# ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАВИСИМОСТЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ КРИСТАЛЛОВ $Sn_2P_2S_6$ ОТ ДАВЛЕНИЯ В АЛМАЗНОЙ КАМЕРЕ

Ю.И.Тягур<sup>1</sup>, В.В.Щенников<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ужгородский национальный университет  
ул. Пидгирна, 46, Ужгород 88000, Украина

<sup>2</sup>Институт физики металлов Уральского отделения Российской академии наук  
620041 Екатеринбург, Россия

Проведены измерения зависимостей электрического сопротивления от давления до 3,5 ГПа в алмазной камере на кристаллах  $Sn_2P_2S_6$  при комнатной температуре. Установлено, что  $R(p)$  уменьшается с давлением. Предложены уравнения, которыми можно описать зависимости  $R(p)$ ,  $\alpha_T(p)$ ,  $E_{gR}(T, p)$  от давления для  $Sn_2P_2S_6$ . Методом аппроксимации, определены параметры уравнений и проведен их анализ. Выявлены аномалии в барических зависимостях электрического сопротивления, которые интерпретированы, как новый структурный фазовый переход под давлением в  $Sn_2P_2S_6$  при  $p \approx 3\text{ GPa}$ .