

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

Ю.І. Тягур¹, В.В. Щенніков²

¹Ужгородський національний університет
вул. Підгірна, 46, Ужгород 88000, Україна

²Институт 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 ℓ - довжина, S - площа, ρ - питомий електричний опір, σ - питома електрична провідність, e - заряд електрона, n - концентрація, μ - 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, δ - відносний тисковий коефіцієнт ефективної маси, ξ - 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 $R(p)$.

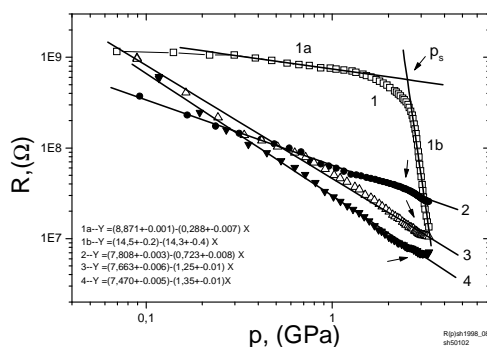


Рис. 1. Залежність електричного опору R від тиску p для кристаліка $Sn_2P_2S_6$ при $T \approx 298 \text{ K}$ в масштабі подвійного десяткового логарифма в режимі циклювання високим тиском в алмазній камері: криві 1, 2, 3, 4, відповідають вимірюванням 1, 2, 3, 4 при зростанні тиску.

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 вимірювань 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.

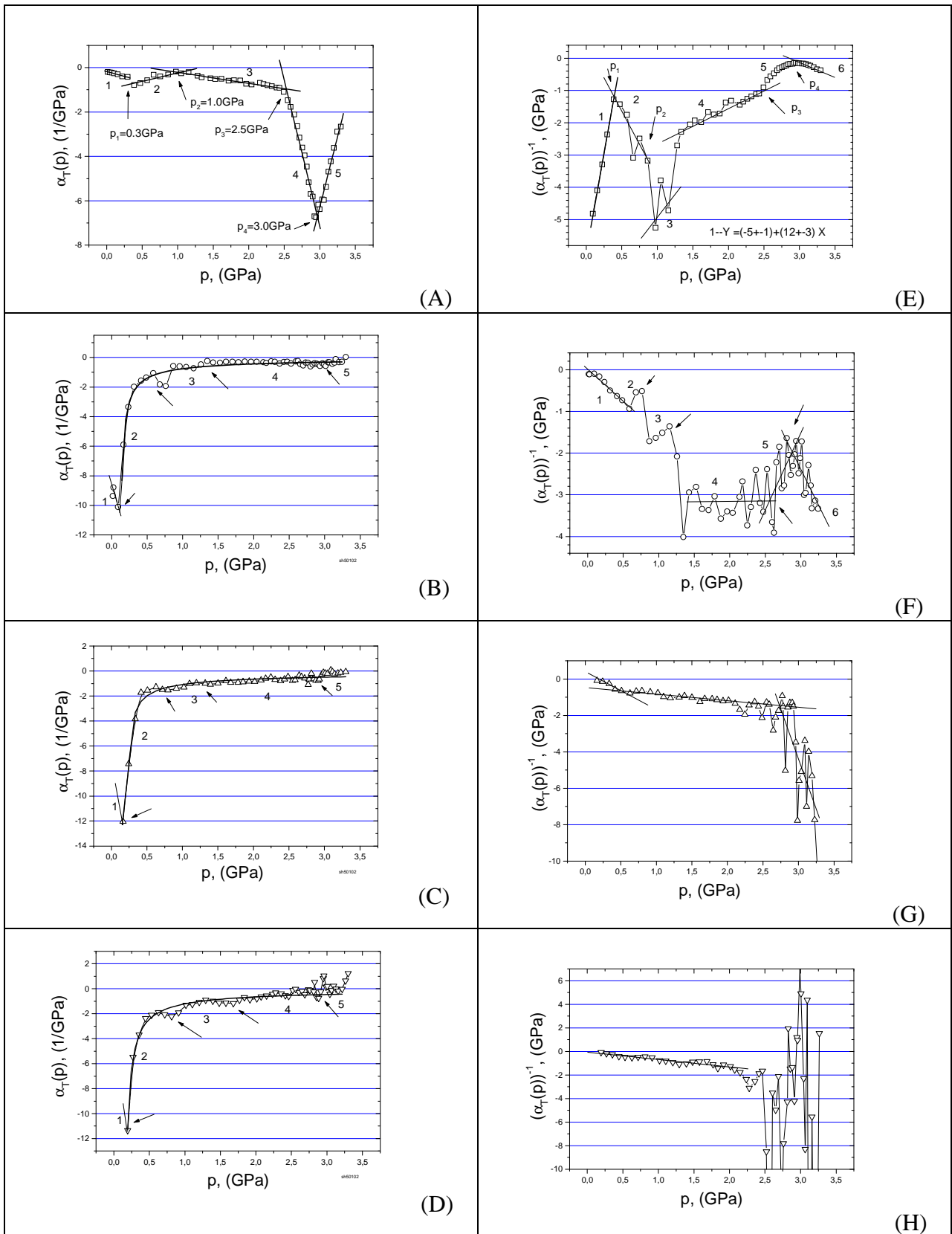


Рис. 2. Залежність відносного баричного коефіцієнту електричного опору $\alpha_T(p)$ і його оберненої величини $(\alpha_T(p))^{-1}$ від тиску при $T \approx 298 K$ для кристалика $Sn_2P_2S_6$ в режимі чотирьох вимірів при збільшенні тиску: $\alpha_T(p)$ ----рис. 2А, В, С, D; $(\alpha_T(p))^{-1}$ ---- 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

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

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

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

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 ± 0.01)	(-1.1 ± 0.1)	0.28 ± 0.05	32 ± 2	(-44 ± 2)
$2 \cdot D_2, \left(\frac{1}{(GPa)^2} \right)$	(-0.9 ± 0.1)	1.0 ± 0.1	(-0.49 ± 0.03)	(-13.2 ± 0.7)	12.6 ± 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 ± 0.1)	(-5.2 ± 2.6)	(-2.3 ± 0.4)	(-2.9 ± 0.7)
$S2 = p_{02}, (GPa)$	0.10 ± 0.01	0.09 ± 0.02	0.21 ± 0.02	0.21 ± 0.04
$S3 = -1$	(-1.0 ± 0.1)	(-0.9 ± 0.2)	(-0.6 ± 0.2)	(-0.5 ± 0.1)
N_2	(-0.24 ± 0.01)	(-0.47 ± 0.02)	(-0.48 ± 0.02)	(-0.61 ± 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 γ_{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).

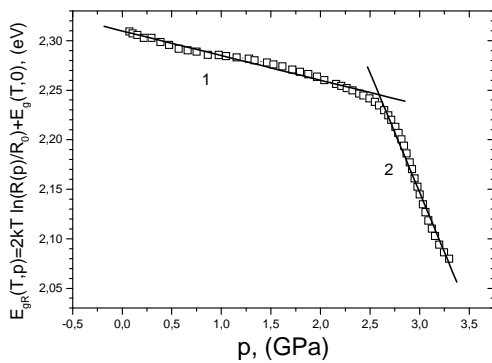


Рис. 3. Залежність енергетичної функції $E_{gR}(T, p)$ від тиску для кристаліка $Sn_2P_2S_6$ при фіксованій температурі $T \approx 298 K$.

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 δ і ξ (2)

Розглянемо вклад ефективної маси і часу релаксації носіїв заряду в $R(p)$. Для цього розрахуємо відносні коефіцієнти δ і ξ 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), β - відносний лінійний тисковий коефіцієнт ширини забороненої зони. З приведенного виразу запишемо зв'язок для δ і ξ 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 δ і ξ залежать від коефіцієнтів апроксимації залежності $E_{gR}(T, p)$ і від коефіцієнта β . Але так як

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

то для фіксованої темпера-

тури знаки коефіцієнтів δ і ξ 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 21st AIRAPT and 45th 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. Tyagur¹, V.V. Shchennikov²

¹Uzhhorod National University

46 Pidhirna Street, UA-88000 Uzhhorod, Ukraine

²High 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.Тягур¹, В.В.Щенников²

¹Ужгородский национальный университет
ул. Пидгирна, 46, Ужгород 88000, Украина

²Институт 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 $p \approx 3\text{ GPa}$.