

Б.С. Дзундза¹, Г.Д. Матеїк², Ю.В. Кланічка¹

Післяконденсаційні процеси рекристалізації мозаїчних плівок РbТе на слюді

¹Кафедра фізики і хімії твердого тіла Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника, вул. Галицька, 201, Івано-Франківськ, 76008, Україна, E-mail: freik@pu.if.ua

²Кафедра фізики і новітніх технологій Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу вул. Карпатська 15, Івано-Франківськ, 76000, Україна

Досліджено зміну питомого опору ρ мозаїчних плівок РbТе від часу t їх витримки у вакуумі. Запропоновано аналітичну і електротехнічну моделі для обрахунку опору плівок. Показано, що зміна $\rho(t)$ пов'язана із процесами рекристалізації. Визначено залежність лінійних розмірів зерен мозаїки від часу відпалу.

Ключові слова: тонкі плівки, телурид свинцю, питомий опір, рекристалізація, електротехнічна модель.

Стаття поступила до редакції 03.09.2005; прийнята до друку 15.06.2006.

Вступ

Плівки халькогенідів свинцю є перспективними для створення на їх основі активних елементів мікро- і оптоелектроніки: детектори і джерела інфрачервоного випромінювання оптичного спектру [1], термоелектричні перетворювачі енергії [2]. Зауважимо, що значення робочих характеристик приладових структур і їх стабільність у часі визначаються структурним станом і деградаційними процесами, що мають місце у тонкоплівковому матеріалі.

Метою роботи є розробка фізичних моделей, які дають можливість пояснити встановлені експериментально зміни електричних властивостей мозаїчних плівок РbТе при їх ізотермічному відпалі у вакуумі.

I. Методика експерименту і результати

Для приготування плівок використовувався метод термічного випаровування у вакуумі. В якості підкладок були свіжі сколи (0001) слюда – мусковіт, при температурі $T_n = 500-600$ К. Початкова шихта готувалася із сплаву стехіометричного складу, швидкість осадження знаходилася в межах $10-13$ Å/с, а товщина складала $\sim 0,3$ мкм [3].

Електронно-мікроскопічне і електронно-графічне вивчення структури приготовлених плівок показало, що вони мають мозаїчну структуру з орієнтацією

(111) [110] РbТе \parallel (0001) $[10\bar{1}0]$ слюди; лінійні розміри блоків у декілька разів перевищували товщину плівки.

У результаті проведених досліджень електричних властивостей було встановлено, що після завершення процесу осадження плівки мали n-тип провідності. Концентрація електронів, визначена з холлівських вимірювань, залежала від температури підкладки T_n і зростала від $6 \cdot 10^{17}$ см⁻³ при $T_n = 500$ К до $8 \cdot 10^{18}$ см⁻³ при $T_n = 600$ К, що обумовлювало зменшення питомого опору плівок

На рис. 1 показані часові залежності питомого опору плівок РbТе осаджених на слюду при різних температурах підкладки T_n . Видно, що питомий опір при витримці з часом має тенденцію до зменшення. Цей факт вказує на те що в плівках відбуваються процеси, пов'язані із впорядкуванням структури, зокрема процеси післяконденсаційної рекристалізації.

II. Аналітична апроксимація експериментальних результатів

Представлені експериментальні результати значень питомого опору плівок РbТе при різних T_n від часу витримки у вакуумі (рис. 1) можна аналітично описати такою експоненціальною функцією:

$$\rho = \rho_n + \rho_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} \quad (1)$$

Тут ρ_n , ρ_1 – питомі опори плівок які залежать від їх

стану і є підгоночними параметрами; τ_1 – сталі часу релаксації для відповідних змін питомого опору, що визначаються на основі апроксимації експериментальних кривих аналітичним виразом (1). Отримані значення ρ_n , ρ_1 , та τ_1 наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Значення коефіцієнтів у апроксимаційній функції (1) залежності питомого опору плівки PbTe від часу відпалу.

	Крива-1 $T_n=500K$	Крива-2 $T_n=560K$	Крива-3 $T_n=600K$
$\rho_0, \text{ Ом см}$	0,043	0,003	0,052
$\tau_1, \text{ хв}$	540,5	391,1	325,3
$\rho_1, \text{ Ом см}$	0,023	0,058	0,028

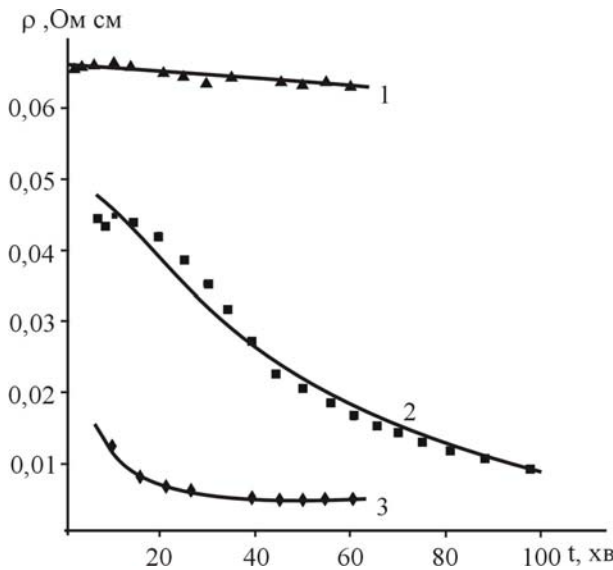


Рис. 1. Зміна питомого опору (ρ) мозаїчних плівки РЬТе від часу відпалу (t). Температура підкладки T_n, K : 1 – 500; 2 – 560; 3 – 600. Точки – експеримент; суцільні лінії – розрахунок згідно (1).

Слід зауважити, що монотонні зміни питомого опору плівки добре апроксимуються за допомогою однієї експоненціальної функції (1), що вказує на переважання одного певного фізичного процесу, який ми пов'язуємо із процесами післяконденсаційної рекристалізації.

III. Електротехнічна модель опору плівки

Тонку мозаїчну плівку представимо як систему кристалітів у вигляді паралелепіпедів висотою l і основою $l_1 \times l_1$ які мають міжзеренні межі товщиною h (рис. 2,а) [4]. Тоді лінійний розмір самого моноблочного зерна буде дорівнювати $d_1 = l_1 - 2h$, а його опір $R_0 = \rho_0 d_1^{-1}$, де ρ_0 – питомий опір кристалітів. Крім того, така електротехнічна комірка буде мати ще чотири опори $R_{g||}$ міжзеренних меж, що включені паралельно і два опори $R_{g\perp}$ послідовних до

R_0 (рис. 2,б):

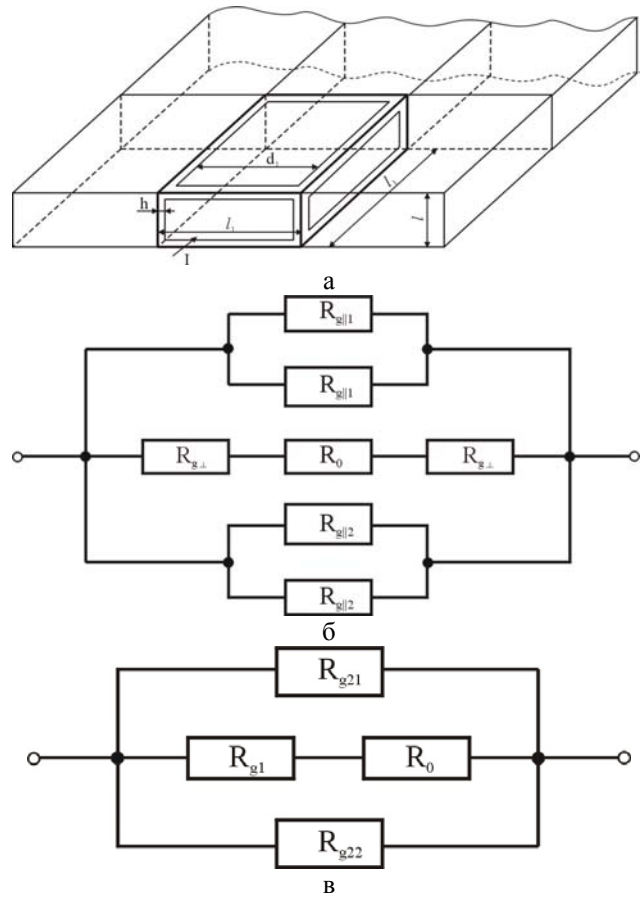


Рис. 2. Модель мозаїчної структури плівки РЬТе (а), та її еквівалентна електротехнічна схема (б,в).

$$R_{g21} = \frac{1}{2} R_{g||1} = \rho_g \frac{l_1}{2lh} \quad (2)$$

$$R_{g22} = \frac{1}{2} R_{g||2} = \rho_g \frac{l_1}{2d_1 h}$$

$$R_{g1} = 2R_{g\perp} = \rho_g \frac{2h}{dd_1} \quad (3)$$

Тут ρ_g – питомий опір області міжзеренних меж.

Враховуючи еквівалентну схему (рис. 2,в), загальний опір кристаліта з міжзеренними межами R_e буде визначатися співвідношенням:

$$\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_0 + R_{g1}} + \frac{1}{R_{g21}} + \frac{1}{R_{g22}},$$

$$R_e = \frac{(R_0 + R_{g1})R_{g21}R_{g22}}{R_{g21} + R_{g22} + (R_0 + R_{g1})R_{g22} + (R_0 + R_{g1})R_{g21}} \quad (4)$$

Знаючи опір електротехнічної комірки плівки R_e можна визначити її еквівалентний питомий опір:

$$\rho_e = R_e l. \quad (5)$$

Беручи до уваги обґрунтоване твердження про те, що питомі опори кристалітів (ρ_0) і міжзеренних меж (ρ_g) у процесі структурних змін у плівках не змінюються, можна знайти залежність питомого опору плівки від лінійних розмірів кристалітів (l_1, h) за умови $\rho = \rho_e$ згідно співвідношень (1) і (5).

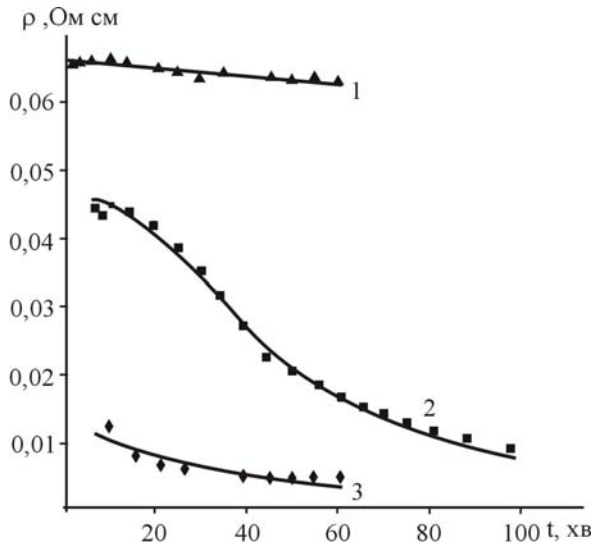


Рис. 3. Зміна питомого опору полікристалічних плівок PbTe від часу відпалу. Температура підкладки $T_{п,К}$: 1 – 500; 2 – 560; 3 – 600. Точки – експеримент; суцільні лінії – розрахунок згідно електротехнічної моделі.

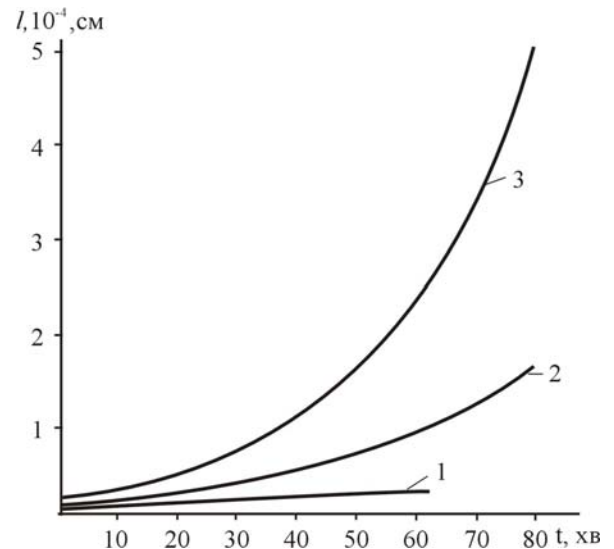


Рис. 4. Залежність розмірів мозаїчних зерен плівок PbTe від часу відпалу. Температура підкладки $T_{п,К}$: 1 – 500; 2 – 560; 3 – 600.

Апроксимація електротехнічною моделлю (рис. 2) залежності питомого опору полікристалічних плівок PbTe від часу їх витримки (рис. 3) вказує, що добре співпадання результатів експерименту і розрахунків має місце при наступному характері зміни лінійних розмірів кристалітів (рис. 4):

$$l(t) = l_0 e^{a_0 t}. \quad (10)$$

Тут l_0 початковий розмір мозаїчних зерен у плівках, a_0 деяка стала величина, яка залежить від стріктурного стану плівки.

Зауважимо, що результати апроксимації підтверджують також і той факт, що на питомий опір плівок суттєво не впливає зміна товщини міжзеренних меж (h): вона суттєво не змінюється при структурних процесах у даній плівці (табл. 2).

Таблиця 2

Значення коефіцієнтів у електротехнічній моделі опору мозаїчних плівок PbTe

	Крива-1 $T_{п}=500К$	Крива-2 $T_{п}=560К$	Крива-3 $T_{п}=600К$
$h, \text{ см}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$9 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-6}$
$\rho_0, \text{ Ом см}$	0,062	0,012	0,006
$\rho_g, \text{ Ом см}$	0,068	0,05	0,02
$l_0, \text{ см}$	$2,1 \cdot 10^{-5}$	$2,4 \cdot 10^{-5}$	$4,6 \cdot 10^{-5}$
$a_0, \text{ хв.}^{-1}$	0,0017	0,038	0,018

Крім того у електротехнічній моделі вважали, що висота блоків мозаїки не змінювалася і дорівнювала товщині плівки (l).

Слід звернути увагу також і на те, що питомий опір областей міжзеренних меж (ρ_g) у декілька разів перевищує опір кристалітів (ρ_0) (табл. 2). Це пов'язано із тим, що кристалічна структура міжзеренних меж є менш досконалою ніж у самих мозаїчних зернах.

IV. Аналіз результатів дослідження

Експериментальні результати (рис. 1,3), а також їх аналітична апроксимація (рис. 1) та розрахунки на основі електротехнічної моделі (рис. 3) залежностей питомого опору мозаїчних плівок PbTe, від часу їх витримки у вакуумі після завершення процесу осадження вказують на те, що мають місце рекристалізаційні процеси. При цьому слід відзначити такі їх особливості. Плівки PbTe осаджені при низьких температурах підкладок мають найбільший питомий опір ρ_0 і найменше значення розмірів мозаїчних зерен l_0 (табл. 2). Підвищення температури осадження обумовлює зменшення питомого опору зерен та зростання розмірів окремих кристалітів (табл. 2). Це пов'язано із конденсаційними процесами на підкладці, що приводить до покращення структурної досконалості плівок із підвищенням температури осадження. Слід також відзначити і те, що найменш досконалі плівки мають найбільше значення питомого опору міжзеренних границь (табл. 2).

Ізотермічна витримка цих плівок у вакуумі зумовлює зростання величини кристалітів для всіх досліджуваних зразків (рис. 4). При цьому рекристалізаційні процеси при низьких температурах осадження ($T_{п} = 500 \text{ К}$) незначні (рис. 4, крива 1): величина зерен з часом витримки суттєво не змінюється. Із покращенням структурної досконалості плівок і підвищенням температури відпалу інтенсивність рекристалізаційних процесів значно зростає: величина зерен збільшується (рис. 4, криві 2,3). Так зокрема для плівок осаджених і відпалених при температурі $T_{п} = 600 \text{ К}$ величина блоків мозаїки зростає більш ніж на порядок (рис. 4, криві 3).

Висновки

1. Досліджено залежності питомого опору мозаїчних плівок PbTe від часу їх відпалу у вакуумі.
2. Виконано апроксимацію експериментальних результатів зміни питомого опору полікристалічних плівок PbTe від часу їх відпалу у вакуумі аналітичними виразами які містять експоненціальні функції.
3. Запропонована електротехнічна модель опору полікристалічних плівок PbTe, визначено залежності зміни лінійних розмірів кристалітів від часу відпалу..
4. Зміну питомого опору мозаїчних плівок пояснено процесами рекристалізації.

Автори висловлюють вдячність проф. Фреїку Д.М. за постановку задачі, цінні поради та обговорення результатів дослідження.

Робота виконана за умови часткового фінансування МОН України, державний реєстраційний номер 0106U000220/

Дзундза Б.С. – аспірант кафедри фізики і хімії твердого тіла;
Матеїк Г.Д. – кандидат фізико-математичних наук, доцент;
Кланічка Ю.В. – аспірант кафедри фізики і хімії твердого тіла.

- [1] Ф.Ф. Сизов. Твердые растворы халькогенидов свинца и олова и фотоприемники на их основе // *Зарубежная электронная техника*, **24**, сс. 31-48 (1977).
- [2] В.М. Шперун, Д.М. Фреїк, Р.І. Запухляк. *Термоелектрика телуриду свинцю та його аналогів*. Плай, Івано-Франківськ (2000).
- [3] Ю.А. Бойков, В.А. Кутасов. Изменения в концентрации и подвижности носителей заряда в пленках PbTe после завершения процесса конденсации // *Физика твердого тела*, **23**(8), сс. 2527-2529 (1981)
- [4] Я.П. Салій, І.М. Фреїк. Електротехнічна модель тонких полікристалічних плівок PbTe // *Фізика і хімія твердого тіла*, **5**(1), сс. 94-95 (2004).

B.S. Dzundza¹, G.D. Mateik², Yu.V. Klanichka³

Post-Condensation Processes of Re-Crystallization of the Polycrystal PbTe Films on Mica

¹*Sub-Faculty of the Physics and Chemistry of Solid State Vasyl Stefanyk PreCarpathian National University, 57, Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk, 76000, Ukraine, E-mail: freik@pu.if.ua*

²*Sub-Faculty of the Physics and New Technology Ivano-Frankivsk National University of Oil and Gas 15, Karpatska Str., Ivano-Frankivsk, 76000, Ukraine*

The change of specific resistance (ρ) of PbTe polycrystal films us time of their self-controls in vacuum (t) by mathematical dependences are researches. The analytic and electrical-techniques model for resistance calculation of PbTe films are proposed. It is shown, that the $\rho(t)$ change is related with crystallization processes. The dependence of linear sizes of grain us time of their annealing is determine.