

УДК 539,234.621,239.14

Д.М. Фреїк, Я.П. Салій, О.Я. Довгий, М.О. Галушак, І.В. Калитчук
**Ефективні і локальні значення електричних параметрів у
полікристалічних плівках телуриду свинцю**

*Фізико-хімічний інститут при Прикарпатському університеті імені Василя Стефаника, вул. Шевченка, 57,
м. Івано-Франківськ, 76000, Україна*

Досліджено залежність ефективних значень питомої електропровідності, коефіцієнта Холла, холлівських концентрації і рухливості носіїв струму від товщини полікристалічних плівок PbTe. Зроблено розрахунок профілей їх розподілу по товщині. На основі одержаних експериментальних і розрахункових результатів запропоновано механізми процесів дефектоутворення.

Ключові слова: тонкі плівки, телурид свинцю, електричні параметри, дефекти.

Стаття поступила до редакції 21.06.2001; прийнята до друку 1.11.2001.

I. Вступ

Властивості тонких напівпровідникових плівок халькогенідів свинцю визначаються багатьма факторами – технологічними у процесі вирощування, умовами їх наступної експлуатації [1]. У роботах [2-7] виявлено зокрема, прояв неоднорідностей електричних параметрів за товщиною як у полікристалічних, так і монокристалічних плівках монохалькогенідів свинцю і твердих розчинів на їх основі. Так, зокрема, на думку авторів [4] зміна концентрації носіїв струму в епітаксійних плівках PbS n- і p- типу провідності визначається збідненням матеріалу сіркою у напрямку від підкладки до поверхні. При цьому термовідпал у вакуумі плівок p- PbS веде до інверсії типу провідності у приповерхневій області і утворення двошарової p-n структури, параметри якої визначаються температурою і часом відпалу. Виявлено також неоднорідності питомої електропровідності [7].

У даній роботі досліджено неоднорідності електричних параметрів у

свіжовирощених і витриманих в атмосфері кисню полікристалічних плівках PbTe.

II. Методика експерименту і результати

Плівки PbTe вирощувалися методом гарячої стінки на поліамідній підкладці при температурі осадження $T_{\text{П}} = 573 \text{ K}$ [1]. Температура випарника складала $T_{\text{В}} = 848 \text{ K}$, а швидкість осадження плівки дорівнювала $\sim 2 \cdot 10^4 \text{ \AA s}^{-1}$. Одержані плівки мали полікристалічну структуру із величиною зерен $\sim 0,1 \text{ мкм}$ і деякою переважаючою орієнтацією (001) до поверхні підкладки.

Ефективні значення коефіцієнта Холла (R_{H}), питомої електропровідності (σ), рухливості (μ) і концентрації (n) носіїв струму пошарово стравленої до певної товщини плівки, одержували із вимірювань ефекту Холла і електропровідності у постійних електричних і магнітних полях [8,9]. Пошарове стравлювання здійснювали хімічним методом у травнику на основі

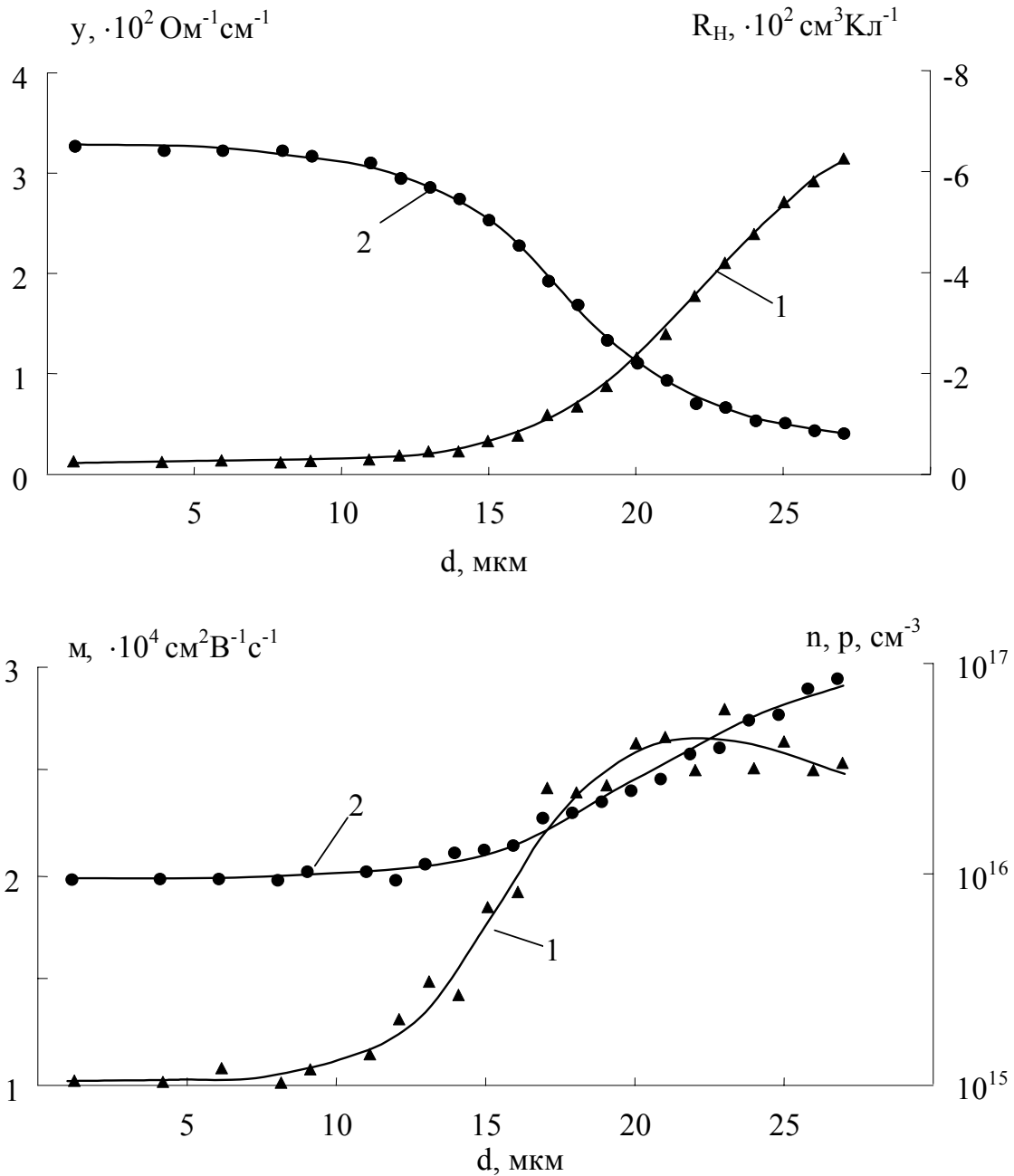


Рис. 1. Зміна ефективних питомої електропровідності ($\sigma - 1$), сталої Холла ($R_H - 2$), рухливості ($\mu - 3$) і концентрації ($n - 4$) у свіжовирощених плівках PbTe при пошаровому стравленні.

$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ і $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$. Використовувана методика і апаратура забезпечувала похибку вимірювань $\sim 5\%$. Товщину плівки змінювали від 27 до 0,5 μm .

Залежності виміряних ефективних значень σ і R_H і обчислених μ і n наведено відповідно на рис. 1 для свіжовирощених, і на рис. 2 для витриманих в атмосфері кисню

плівок. Слід зауважити, що якщо свіжовирощені плівки PbTe, за заданих умов вирощування, характеризуються тільки електронною провідністю (n-тип) (рис. 1), то витримані в атмосфері кисню до року – мають неоднорідності за знаком сталої Холла (рис. 2, крива 2) і типом провідності (рис. 2, крива 4). При цьому, в значення

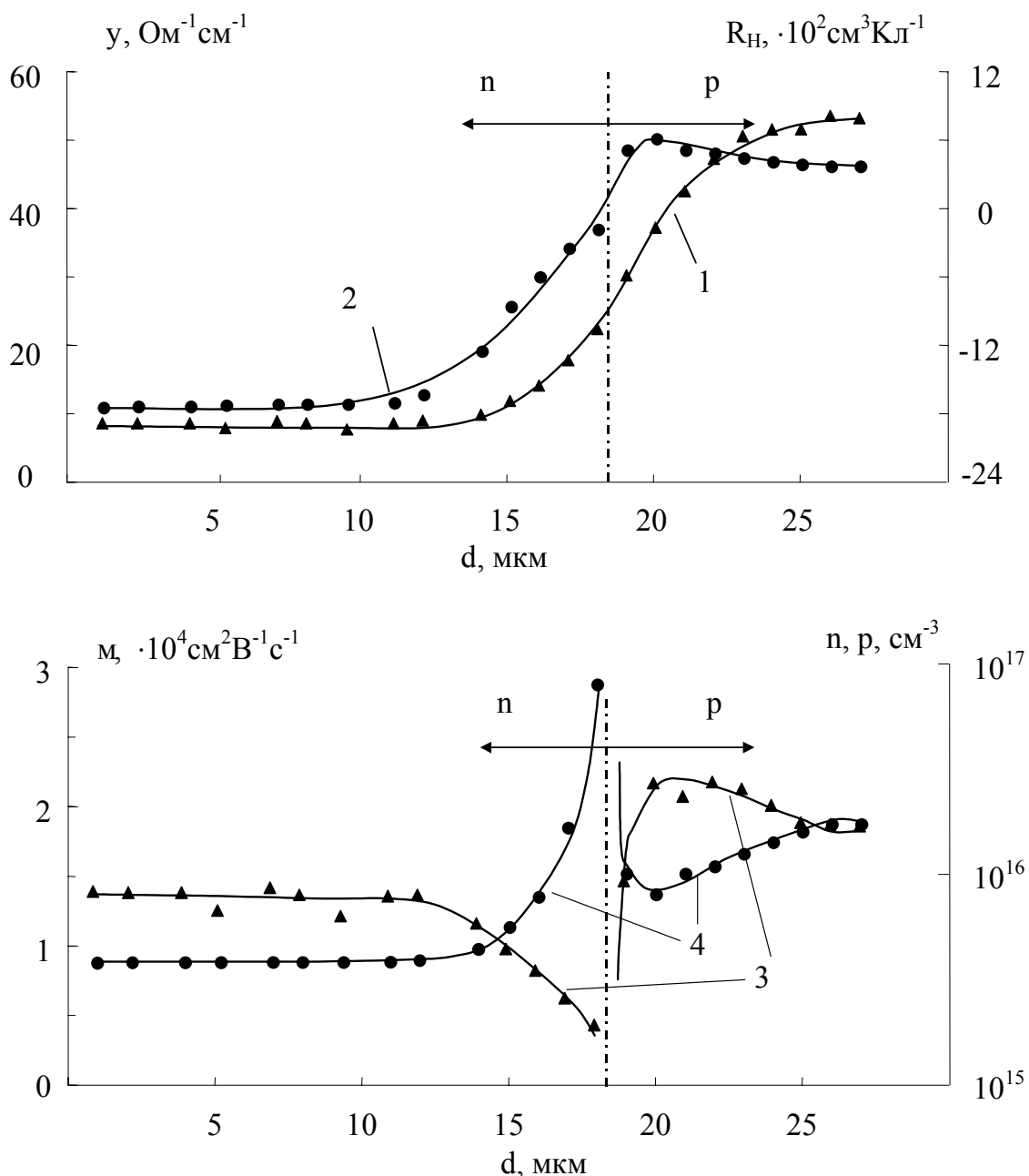


Рис. 2. Зміна ефективних питомої електропровідності ($\sigma - 1$), сталої Холла ($R_H - 2$), рухливості ($\mu - 3$) і концентрації ($n - 4$) у витриманих в атмосфері кисню плівках PbTe при пошаровому травленні.

ефективних кінетичних параметрів плівок, стравлених до різної товщини, в напрямку травлення має місце зменшення сумарного внеску шарів р-типу провідності і зростання – n-типу (рис. 2).

III. Розрахунок профілів кінетичних параметрів

Виміряні ефективні кінетичні

параметри (рис 1, 2) є деякими інтегральними величинами [10] і залежать від профілю розподілу концентрації носіїв заряду і питомої електропровідності – локальних значень [4,6,7]. Розрахунок напрямленої зміни локальних значень кінетичних параметрів плівок по товщині здійснювали згідно відомих співвідношень [10]:

$$\sigma(d) = \int_0^d \sigma(z) dz / d; \quad (1)$$

$$R_H(d) = \frac{\int_0^d R_H(z) \sigma^2(z) dz}{d \sigma^2}; \quad (2)$$

$$\mu(d) = R_H(d) \sigma(d). \quad (3)$$

Тут $\sigma(z)$, $R_H(z)$, $\mu(z)$ вказують дійсні значення коефіцієнта Холла, питомої електропровідності і холлівської рухливості на товщині z , а отже є функціями розподілу відповідних кінетичних параметрів по товщині плівки; d – товщина плівки; z –

координата в напрямі нормалі до поверхні плівки ($z=0$ відповідає границі розділу підкладка-плівка). Елементарні шари dz плівки, як видно з формули (2), вносять вклад в інтегральне значення R_H , пропорційний їх коефіцієнту Холла і питомій електропровідності, при чому вклад може бути протилежним в залежності від знаку $R_H(z)$.

На основі (1-3), вважаючи, що локальні кінетичні параметри елементарних шарів товщиною Δd є в них рівнозмірними по z , отримаємо:

$$\sigma(z=d) = \frac{\left[\sigma(d + \frac{\Delta d}{2}) \cdot (d + \frac{\Delta d}{2}) - \sigma(d - \frac{\Delta d}{2}) \cdot (d - \frac{\Delta d}{2}) \right]}{\Delta d}; \quad (4)$$

$$R_H(z=d) = \frac{\left[(R_H(d + \frac{\Delta d}{2}) \cdot (d + \frac{\Delta d}{2}) \cdot \sigma^2(d + \frac{\Delta d}{2}) - (R_H(d - \frac{\Delta d}{2}) \cdot (d - \frac{\Delta d}{2}) \cdot \sigma^2(d - \frac{\Delta d}{2})) \right] \Delta d}{\left[\sigma(d + \frac{\Delta d}{2}) \cdot (d + \frac{\Delta d}{2}) - \sigma(d - \frac{\Delta d}{2}) \cdot (d - \frac{\Delta d}{2}) \right]^2}; \quad (5)$$

$$\mu(z) = R_H(z) \sigma(z); \quad (6)$$

$$p, n(z) = \frac{1}{R_H(z) \cdot e}. \quad (7)$$

Розраховані профілі розподілу коефіцієнта Холла і провідності, рухливості і концентрації носіїв струму по товщині плівок PbTe наведені на рис. 3, 4.

IV. Обговорення результатів

Тип провідності у халькогенідах свинцю визначається, у першу чергу, власними атомними дефектами, пов'язаними із відхиленнями від стехіометричного складу [11,12]. Встановлено, що для нелегованого матеріалу надлишок свинцю обумовлює вакансії у підгратці халькогену, які є донорами і визначають концентрацію електронів n -провідності. У нашому

випадку, для свіжовирощених плівок реалізуються термодинамічні умови, що забезпечують ріст тонкоплівкового матеріалу n -типу [14]. Це ще може бути обумовлене і збідненням шихти на більш летючу компоненту – телур – у процесі випаровування наважки, так і зміною складу вже вирощеної плівки, на що вказується вище. На реальність таких процесів вказує зростання локальної концентрації електронів з ростом товщини свіжовирощених (рис. 3, крива 4) і на малих товщинах ($d \approx 18$ мкм) витриманих в атмосфері кисню (рис. 4, крива 4) плівок PbTe.

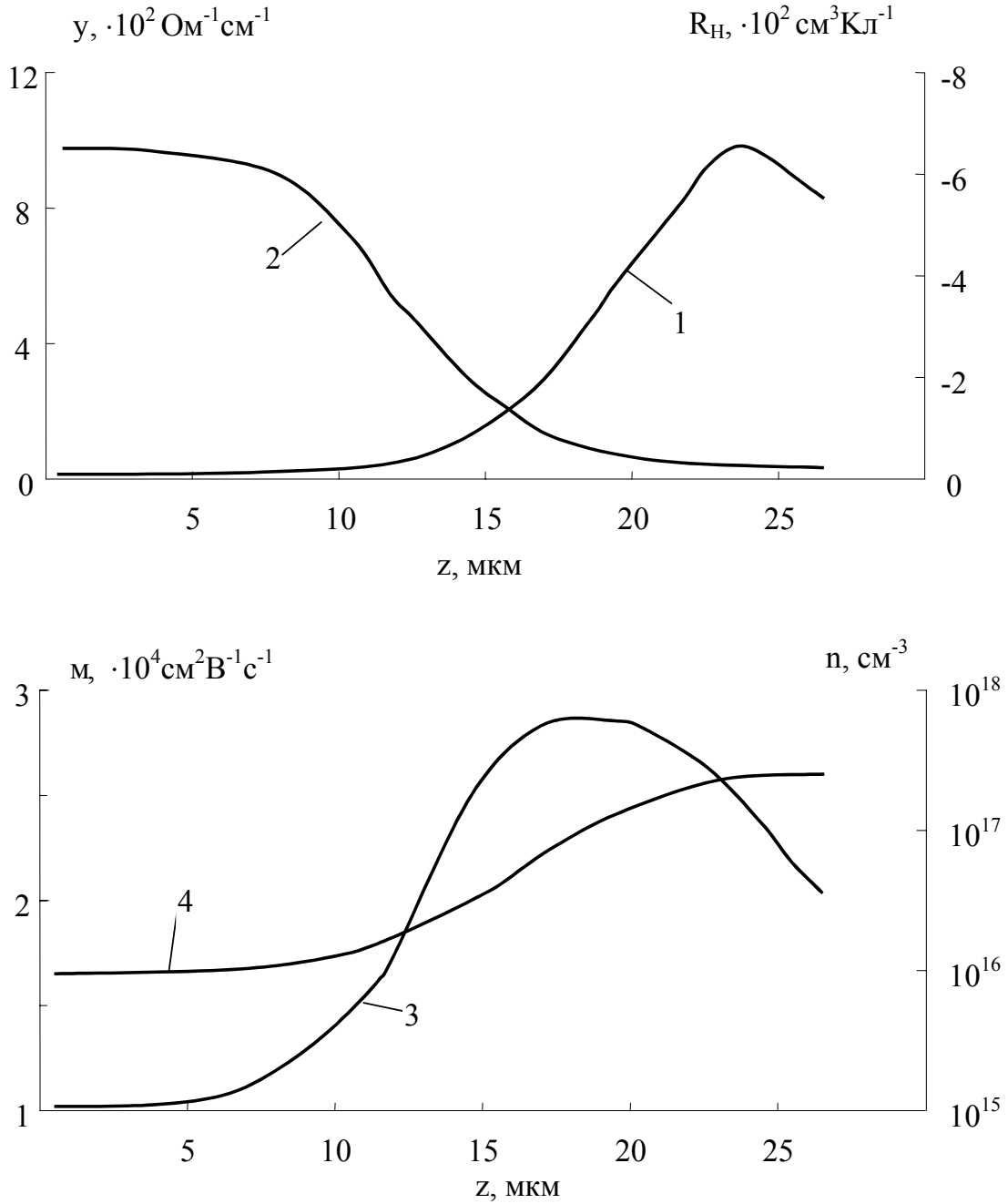


Рис. 3. Профіль розподілу локальних значень питомої електропровідності ($\sigma - 1$), сталої Холла ($R_H - 2$), рухливості ($\mu - 3$) і концентрації ($n - 4$) у свіжовирощених плівках PbTe.

Як видно із рис.2, 4 для плівок витриманих в атмосфері кисню концентрація електронів, починаючи із товщин ~ 10 мкм, швидко зростає, наближаючись до нескінченості. В точці розриву має місце інверсія типу провідності

(зміна знаку коефіцієнту Холла), а холлівська рухливість стає близькою до нуля. Залежності, що спостерігаються характерні для двошарових структур, які мають протилежний тип провідності [5]. Предумовою цього є те, що полікристалічні

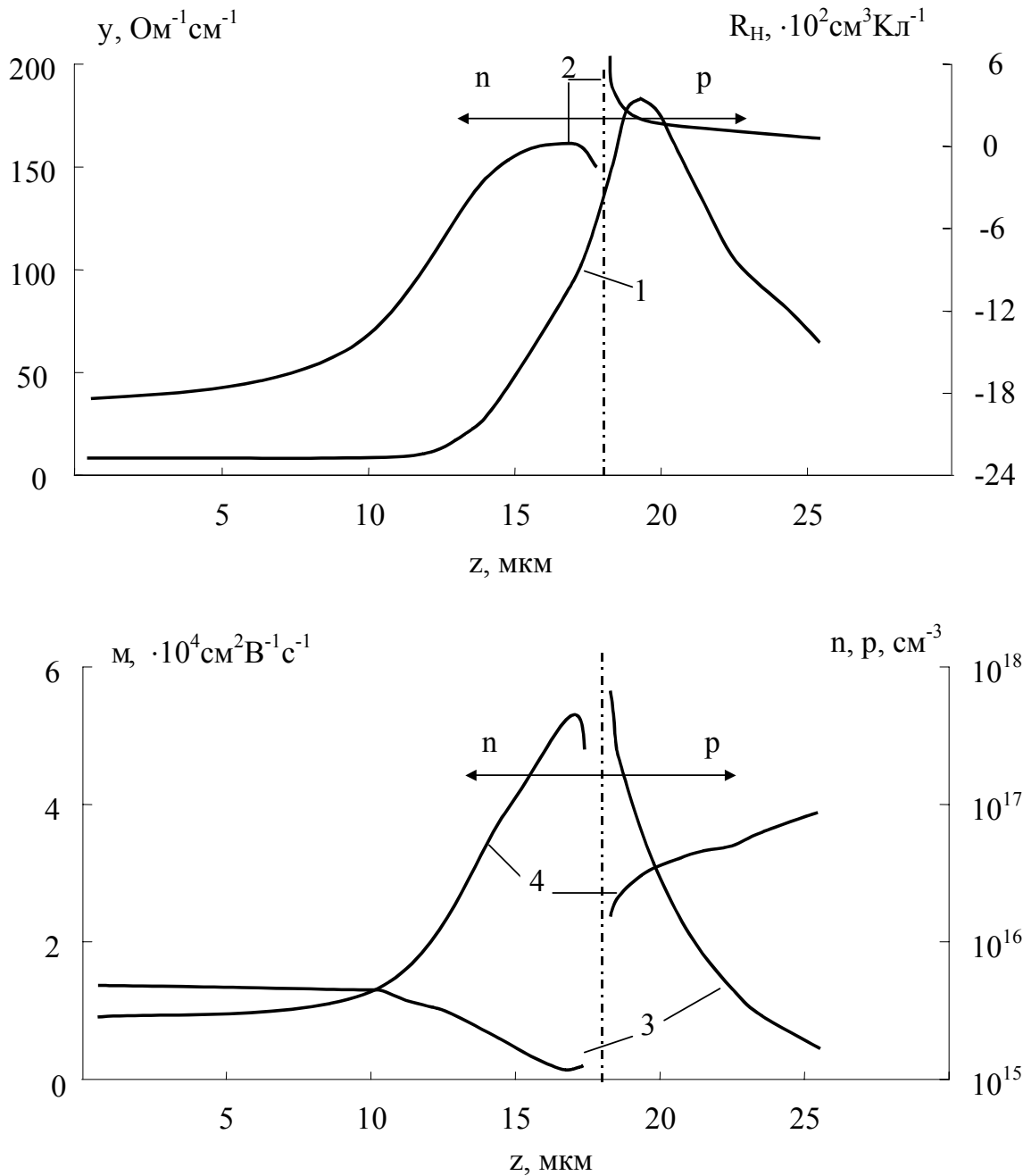


Рис. 4. Профіль розподілу локальних значень питомої електропровідності ($\sigma - 1$), сталої Холла ($R_H - 2$), рухливості ($\mu - 3$) і концентрації ($n - 4$) у витриманих в атмосфері кисню плівках PbTe.

плівки PbTe, перебуваючи в атмосфері кисню, активно взаємодіють із киснем який є ефективним акцептором. Мігруючи по границях зерен [13], він проникає у глибину плівки, компенсуючи донорні центри. Внаслідок цього на поверхні плівок утворюється достатньо товстий шар р-типу провідності (рис. 4, крива 4).

Зміна ефективних і локальних значень

питомої електропровідності з товщиною плівок корелює із значеннями концентрації та рухливості носіїв струму. Так початкове зростання σ з товщиною для витриманих в атмосфері кисню плівок (рис. 2, 4, криві 1) пов'язане із збільшенням концентрації електронів (рис. 2; 4, криві 4). Спад же σ з товщиною плівок для р-області (рис. 4, крива 1) обумовлений значним зменшенням

рухливості носіїв струму (рис. 4, крива 3) за рахунок їх розсіювання на енергетичних потенціалах границь зерен полікристалічних плівок утворених акцепторним впливом кисню.

V. Висновки

1. Досліджено ефективні і локальні значення електричних параметрів у свіжовирощених і витриманих в атмосфері

кисню полікристалічних плівок PbTe.

2. Свіжовирощені плівки PbTe мають n-тип із неоднорідностями концентрації носіїв струму по товщині, яка зростає до поверхні за рахунок переважання вакансій халькогену.

3. Адсорбція кисню при витримці плівок в атмосфері кисню веде до утворення двошарової структури із приповерхневим р-типом провідності.

- [1] Д.М. Фрейк, М.А. Галушак, Л.Й. Межиловская. *Фізика и технология тонких пленок*. Вища школа, Львов. 182с., (1988).
- [2] A. Klein. High mobility lead-tin-telluride films evaporated onto polyamide substrates // *Vacuum*, **23**(4), pp.245-246 (1983).
- [3] А.Н. Ковалев, В.В. Остробородова, В.И. Парамонов, П.И. Фоломин Проявление неоднородностей в легированных халькогенидах свинца по гальваномангнитным свойствам // *Фізика и техника полупроводников*, **23**(11), сс. 2039-2048, (1989).
- [4] В.И. Левченко, Л.И. Постнова, В.В. Дикарева, Т.Л. Черная, И.В. Пуляева Направленные неоднородности концентрации носителей заряда в эпитаксиальных пленках сульфида свинца // *Неорганические материалы*, **29**(11), сс.1470-1472, (1993).
- [5] В.И. Левченко, Л.И. Постнова Влияние вакуумного отжига на электрофизические свойства эпитаксиальных пленок сульфида свинца // *Неорганические материалы*, **32**(9), сс.1066-1068, (1996).
- [6] О.Я. Довгий Тришарова модель електричних властивостей плівок халькогенідів свинцю // *Фізика і хімія твердого тіла*, **2**(2), сс.325-327 (2001).
- [7] О.Я. Довгий, І.В. Калинчук. Профіль провідності в епітаксійних плівках PbS // *Фізика і хімія твердого тіла*, **2**(3), сс.487-491 (2001).
- [8] Е.В. Кучис *Гальваномангнитные эффекты и методы их исследования*. Радио и связь, М., 264 с. (1990).
- [9] П. Блад, Д.В. Ортон Методы измерения электрических свойств полупроводников // *Зарубежная радиоэлектроника*, **1**, сс.3-49 (1981).
- [10] R.L. Petritz Theory of an Experiment for Measuring the Mobility and Density of Carriers in the Space-Charge Region of a Semiconductor Surface // *Phys. Rev.*, **110**(6), pp.1254-1262 (1958).
- [11] Н.Х. Абрикосов, Л.Е. Шелимов *Полупроводниковые материалы на основе соединений $A^{IV}B^{VI}$* . Наука, М., 195 с. (1975).
- [12] Д.М.Фреїк, В.В.Прокопів, М.О.Галушак, М.В.Пиц, Г.Д.Матеїк. *Кристалохімія і термодинаміка дефектів у сполуках $A^{IV}B^{VI}$* . Плай, Івано-Франківськ (2000).
- [13] Б.М. Рувінський, Д.М. Фреїк, М.А. Рувінський Кристаллохимия собственных дефектов в пленках халькогенидов свинца с учетом механических напряжений и рода подложек // *Фізика і хімія твердого тіла*, **1**(2), сс. 185-194 (2000).
- [14] Я.П. Салій, П.І. Мельник, О.Я. Довгий, В.М. Калинюк. Розмірні ефекти в полікристалічних плівках PbTe // *Фізика і хімія твердого тіла*, **2**(1), сс. 161-163. (2001).

D.M. Freik, Y.P. Saliy, O.Y. Dovgiy, M.O. Galuschak, I.V. Kalytchuk
**Effective and Local Value of electric parameters on
polycrystalline lead telluride films**

*Physics-Chemical Institute at the Vasyl Stefanyk Prekarpathian University
57, Shevchenko St., Ivano-Frankivsk, 76000, Ukraine*

The dependence of effective values of specific conductivity, coefficient of Hall, hall concentrations, and mobility of carriers of current from depth of polycrystalline lead telluride films is explored. The calculation profile of their allocation on depth is made. On the basis of the received experimental and theoretical results the mechanisms of defect formation processes are offered.