

УДК 621.315.592

О.Я. Довгий, І.В. Калитчук

## Профіль провідності в епітаксійних плівках PbS

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

За допомогою моделі Петріца, застосованої окремо для р- і n- типу плівок PbS зроблена оцінка профілю провідності.

**Ключові слова:** PbS, модель Петріца, профіль, електропровідність.

*Стаття поступила до редакції 8.06.2001; прийнята до друку 21.06.2001*

1. Плівки PbS вирощувались методом гарячої стінки на підкладках із монокристалів фториду барію орієнтації (111). В якості вихідних речовин використовували попередньо синтезований сульфід свинцю з контрольованою концентрацією власних нестехіометричних дефектів і елементарну сірку. Швидкість росту плівок складала 0.1-0.5 нм/с при температурах осадження 630-673 К. Товщина зразків була 0.1-1.2 мкм. Після завершення стадії росту зразки охолоджувалися при регульованому потоці пари сірки для збереження однорідності епітаксійного шару. Одержані плівки мали р-тип провідності. Вакуумний відпал плівок проводили при температурі 640 К на протязі 0.5 год.

Кристалічну структуру вирощених плівок контролювали на рентгенівському дифрактометрі Дрон-3М у  $\text{CuK}\alpha$ -випромінюванні у режимі  $\theta - 2\theta$ - і  $\omega$ -скануванні.

Ефективні значення електропровідності, концентрації і рухливості плівок різної товщини одержували з вимірювань ефекту Холла і електропровідності у постійних електричних і магнітних полях при

пошаровому стравлюванню. На основі цих ефективних величин, виміряних до і після чергового травлення, були розраховані дійсні значення кінетичних параметрів стравленого шару. Пошарове стравлювання зразка здійснювали хімічним методом у травнику на основі  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  і  $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ . Товщину шару сульфиду свинцю вимірювали з допомогою інтерферометра Лінніка МП-4. Використовувана методика і апаратура забезпечувала похибку вимірювань  $\sim 5\%$ .

2. Залежність ефективної концентрації, провідності і рухливості носіїв заряду в епітаксіальних плівках PbS від товщини подано на рис. 1. Плівки до 0.45 мкм мали р-тип, а при більших товщинах – n-тип. Це пов'язано із випаровуванням сірки із поверхні плівок [1], що обумовлює утворення вакансій сірки і n-тип. При цьому найменші зміни в електропровідності плівок з товщиною характерні для плівок 0.1 мкм, біля 0.45 мкм і більших за 1 мкм (рис. 1). Для інших товщин плівок має місце більш значима різниця в електропровідності (рис. 1).

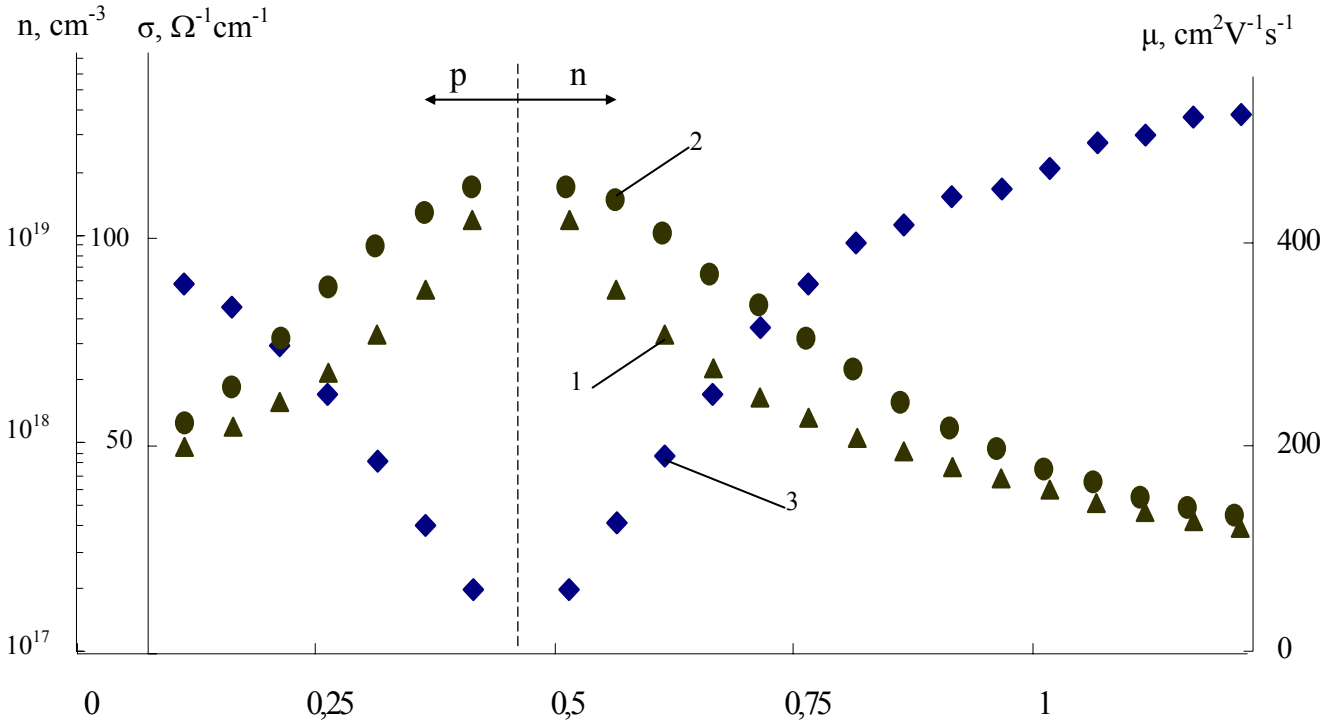


Рис. 1. Залежність ефективної концентрації (1), провідності (2) і рухливості носіїв заряду (3) в епітаксійних плівках PbS від їх товщини.

Рухливість носіїв заряду у плівках як р-типу, так і n-типу із збільшенням концентрації носіїв зменшується (рис. 1).

3. Тришарова модель Петріца [1] (поверхневий, перехідний і об’ємний шар) для профілю розподілу провідності по товщині має вигляд:

$$\sigma(z) = \begin{cases} \sigma_s, & 0 < z < d_{s1} \\ Az + B, & d_{s1} < z < d_{s2} \\ \sigma_b, & d_{s2} < z < d \end{cases} \quad (1)$$

У нашому випадку для двох типів провідності плівки товщиною d окремо (рис. 2) отримаємо:

$$\sigma^p(z) = \begin{cases} \sigma_b^p, & 0 < z < d_{b1}^p \\ A^p z + B^p, & d_{b1}^p < z < d_{b2}^p \\ \sigma_{pn}^p, & d_{b2}^p < z < d^p \end{cases} \quad (2)$$

для плівки р-типу товщиною  $d^p$ ;

$$\sigma^n(z) = \begin{cases} \sigma_{pn}^n, & 0 < z < d_{s1}^n \\ A^n z + B^n, & d_{s1}^n < z < d_{s2}^n \\ \sigma_s^n, & d_{s2}^n < z < d^n \end{cases} \quad (3)$$

для плівки n-типу товщиною  $d^n$ , де  $d^n = d - d^p$ .

Тут  $\sigma^p(z)$ ,  $\sigma^n(z)$  – локальні провідності на товщині z;  $\sigma_{pn}^p$ ,  $\sigma_{pn}^n$  – провідності поверхневих шарів біля межі р-n переходу товщинами  $d^p - d_{b2}^p$ ,  $d_{s1}^n$ ;  $A^p z + B^p$ ,  $A^n z + B^n$  – залежності, що характеризують рухливість перехідних шарів товщинами  $d_{b2}^p$ ,  $d_{s2}^n$ ;  $\sigma_b^p$ ,  $\sigma_s^n$  – провідності в об’ємі і на поверхні плівок з товщинами  $d_{b1}^p$ ,  $d^n - d_{s2}^n$  відповідно. Індекси p і n відповідають р- і n-типу провідності.

Провідність плівки товщиною d яка має шарувату структуру визначається формулою:

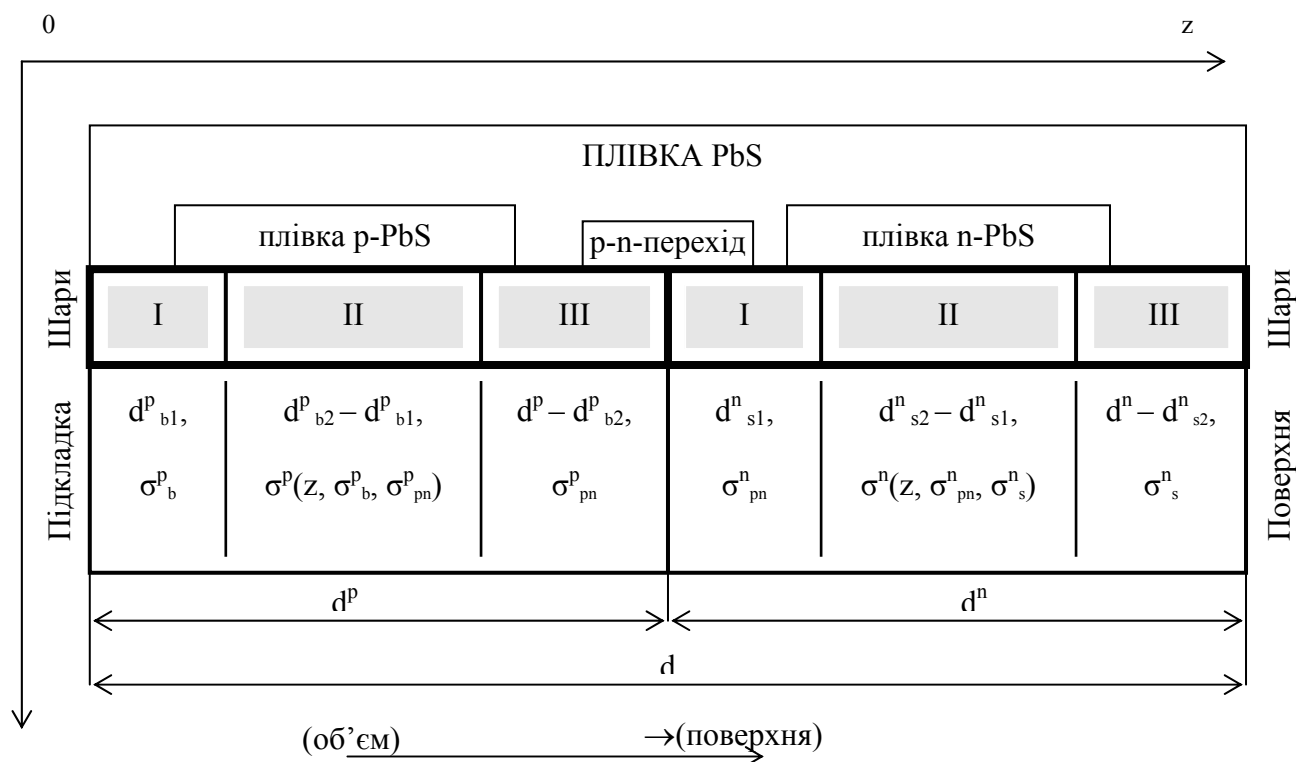


Рис. 2. Моделі тришарових плівок PbS р- і n-типу.

$$\sigma(d) = \int_0^d \sigma(z) dz / d \quad (4)$$

Отже для плівок р- і n-PbS отримаємо відповідно:

$$\sigma^p(d^p) = \int_0^{d^p} \sigma^p(z) dz / d^p \quad (5)$$

$$\sigma^n(d^n) = \int_0^{d^n} \sigma^n(z) dz / d^n \quad (6)$$

Тут  $d^p$ ,  $d^n$  – товщини плівок р- і n-PbS відповідно.

Знайдемо за допомогою формул (5), (6) залежності провідності від товщини для плівок р-PbS і окремо для n-PbS. Для цього у виразі (2) і (3) підкладемо у (5) і (6) відповідно:

$$\sigma^p(d^p) = \begin{cases} \sigma_b^p, & d^p < d_{b1}^p \\ \left[ \sigma_b^p d_{b1}^p + \frac{A^p}{2} (d^{p2} - d_{b1}^{p2}) + B^p (d^p - d_{b1}^p) \right] / d^p, & d_{b1}^p < d^p < d_{b2}^p \\ \left[ \sigma_b^p d_{b1}^p + \frac{A^p}{2} (d_{b2}^{p2} - d_{b1}^{p2}) + B^p (d_{b2}^p - d_{b1}^p) + \sigma_{pn}^p (d^p - d_{b2}^p) \right] / d^p, & d^p > d_{b2}^p \end{cases} \quad (7)$$

$$\sigma^n(d^n) = \begin{cases} \sigma_{pn}^n, & d^n < d_{s1}^n \\ \left[ \sigma_{pn}^n d_{s1}^n + \frac{A^n}{2} (d^{n2} - d_{s1}^{n2}) + B^n (d^n - d_{s1}^n) \right] / d^n, & d_{s1}^n < d^n < d_{s2}^n \\ \left[ \sigma_{pn}^n d_{s1}^n + \frac{A^n}{2} (d_{s2}^{n2} - d_{s1}^{n2}) + B^n (d_{s2}^n - d_{s1}^n) + \sigma_s^n (d^n - d_{s2}^n) \right] / d^n, & d^n > d_{s2}^n \end{cases} \quad (8)$$

4. Апроксимація експериментальних значень провідності модельними представленнями для р- і n- типів плівки PbS подана на рис. 3. При цьому характерні параметри для плівок р-PbS і n-PbS відповідно рівні:  $d_{b1}^p=0.07$  мкм,

$d_{b2}^p=0.26$  мкм,  $\sigma_b^p=53.44 \Omega^{-1}cm^{-1}$ ,  
 $\sigma_{pn}^p=153.44 \Omega^{-1}cm^{-1}$ ;  $d_{s1}^n=0.05$  (0.5) мкм,  
 $d_{s2}^n=0.39$  (0.84) мкм,  $\sigma_{pn}^n=112.96 \Omega^{-1}cm^{-1}$ ,  
 $\sigma_s^n=1.1424 \Omega^{-1}cm^{-1}$ .

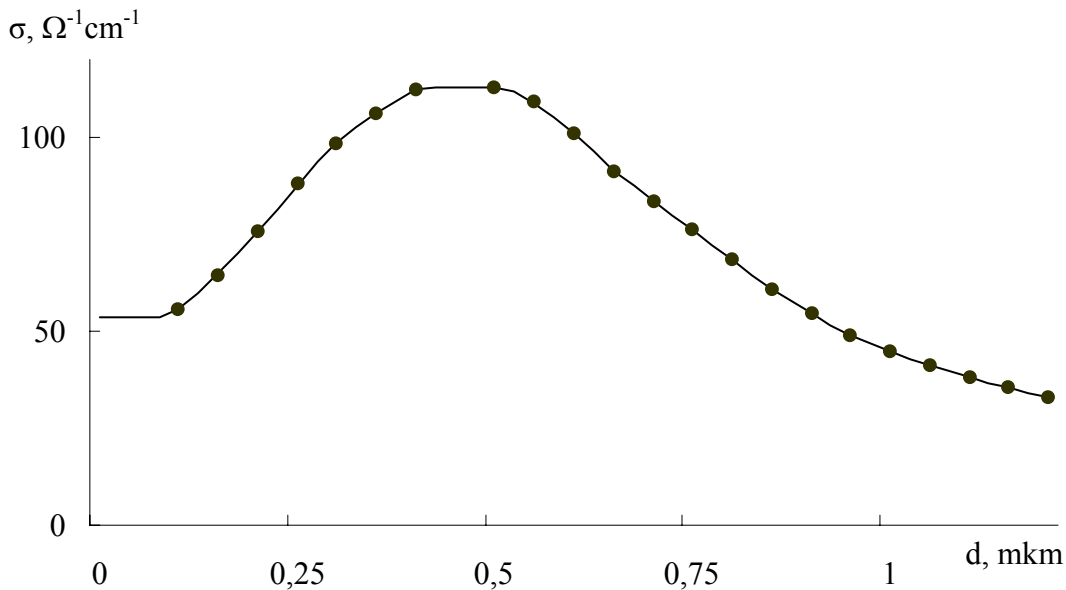
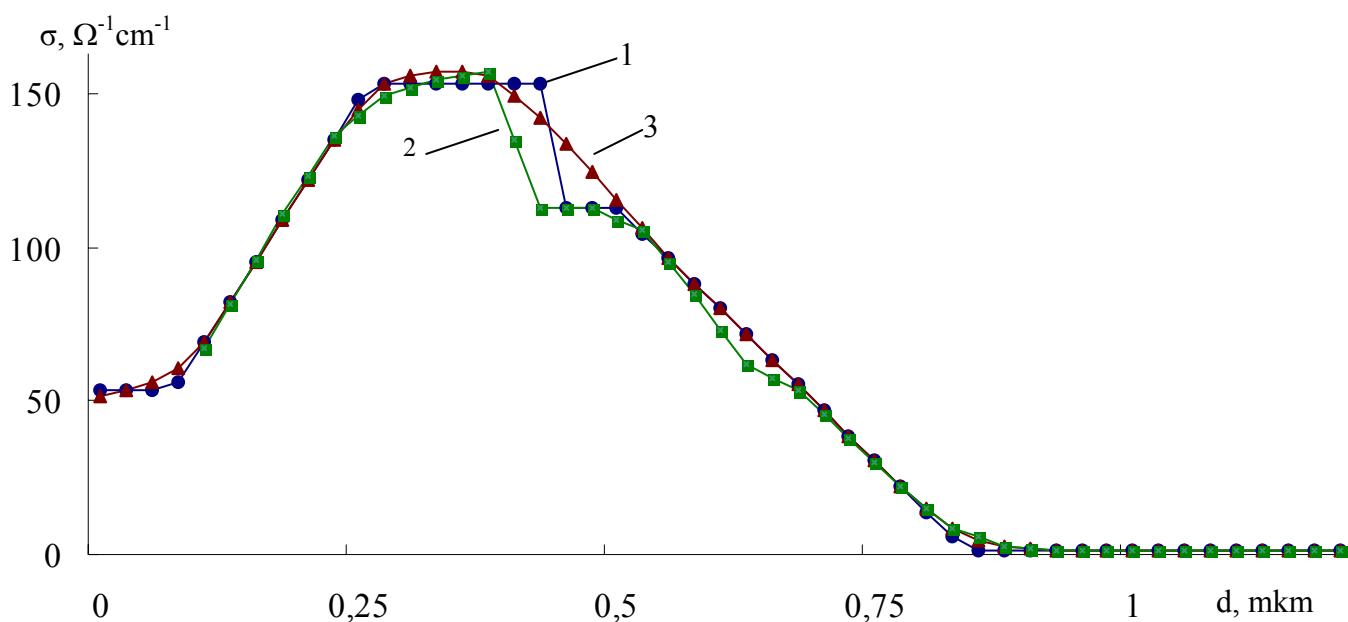


Рис. 3. Апроксимація експериментальних значень залежності ефективної електропровідності від товщини модельними представленнями для плівки PbS р- і n-типу:

• - експеримент, — - розрахунок.

5. Профіль розподілу провідності по товщині плівки згідно запропонованої моделі показано на рис. 4, крива 1. Якщо ж розрахувати з експериментальних даних залежності ефективної провідності від

товщини плівки (рис. 1, 3) за допомогою формули (4) профіль провідності (рис. 4, крива 2), то ми побачимо добре узгодження моделі з експериментом.



**Рис. 4.** Профіль розподілу питомої електропровідності по товщині плівки PbS: 1.-модельний; 2.-експериментальний; 3.- усереднений.

Гладку залежність профілю електропровідності по товщині (рис. 4, крива 3) можна отримати якщо взаємодоповнити провідності р- і n- типу впливом одна на одну біля межі p-n

переходу і узгодити їх біля границь шарів.

Автори вдячні професору Фреїку Д.М. за постановку задачі дослідження і доценту Салію Я.П. за наукові консультації.

- [1] В.И. Левченко, Л.И. Постнова, В.В. Дикарева, Т.Л. Черная, И.В. Пуляева // *Неорган. материалы.* **29**, сс. 1470-1472 (1993).  
 [2] R.L. Petriz // *Phys. Rev.*, **116**. pp. 1254-1256 (1958).

O.Ya. Dovgiy, I.V. Kalytchuk

## Conduction Profile at the PbS Epitaxial Films

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

It is made mark of the conduction profile both p- and n-type PbS films by Petriz model.