

Я.П. Салій

Класичний розмірний ефект в тонких плівках SnTe легованого Sb

Прикарпатський національний університет ім. Василя Стефаника, вул. Шевченка 57, Івано-Франківськ,
Україна, [saliy yaroslav@gmail.com](mailto:saliy Yaroslav@gmail.com)

Встановлена можливість отримання сильно дефектних ($4 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$) тонких плівок ($d = 200 - 2000 \text{ нм}$) SnTe з р- типу провідності шляхом термічного випаровування в вакуумі кристалів SnTe легovanого Sb, з подальшою конденсацією на поверхні (0001) слюди і ситалі. Отримано товщинну залежність електрофізичних властивостей тонких плівок. У цій області товщини спостерігалось зростання рухливості носіїв з товщиною, що обумовлено проявом класичного розмірного ефекту і інтерпретується в рамках теорії Фукса-Зондхеймер. Ці виміри показали слабку кореляцію між довжиною вільного пробігу носіїв заряду і латеральним діаметром поверхневих об'єктів.

Ключові слова: телурид олова, тонка плівка, товщина, розмірний ефект.

Стаття постуила до редакції 27.01.2017; прийнята до друку 05.03.2017.

Вступ

Відомо, що напівпровідники IV-VI широко застосовуються в багатьох областях науки і технології [1]. Телурид олова (SnTe) зарекомендував себе як матеріал, який використовується в термоелектричних перетворювачах енергії (теплових генераторах) [2]. Ефективне використання SnTe можливе при високих концентраціях носіїв заряду ($p \sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$), які не можливо отримати за допомогою відхилення від стехіометрії. В зв'язку з цим SnTe легують різними домішками. Введення сурма і вісмут в решітку SnTe дозволяє досягати значень концентрації до $\sim 10^{20} - 10^{21} \text{ см}^{-3}$ [2]. Збільшення термоелектричної добротності матеріалу, який знаходиться в низько-вимірному стані було експериментально показано, для надрешіток на основі сполук IV-VI [3, 4]. Щодо практичного застосування тонких плівок, важливо враховувати вплив розмірних ефектів (класичного і квантового), які можуть істотно змінювати кінетичні властивості матеріалу [5].

Для плівок PbTe легovanого Bi, отриманих методом термічного випаровування у вакуумі кристалів стехіометричного PbTe з концентрацією електронів $n \sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$, спостерігалось збільшення електропровідності і рухливості з ростом товщини плівки, що було пояснено проявом класичного розмірного ефекту (КлРЕ) [6].

Мало робіт пов'язано з дослідженням товщинних залежностей термоелектричних властивостей плівок SnTe з високим ступенем виродження електронного газу. В роботі [7] показано, що плівки SnTe легovanого Bi показують класичну залежність електрофізичних (ЕФ) властивостей від товщини плівки. Метою даної роботи є більш докладне вивчення впливу товщини d плівок SnTe легovanого Sb з високим ступенем виродження діркового газу ($p \sim 4 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$) на свої ЕФ властивості при кімнатній температурі.

Довжина вільного пробігу і ймовірності пружного розсіювання є найбільш важливими параметрами процесу переносу для вільних носіїв заряду в тонкій плівці. Добре відомо ряд методів їх визначення, в тому числі визначення з товщинної характеристики рухливості. У цій роботі, були визначені параметр дзеркальності і довжина вільного пробігу носіїв заряду в тонких плівках телуриду олова легovanого сурмою, осаджених на слюду і ситал з характеристик рухливості по товщині.

I. Матеріали і методи дослідження

Плівки SnTe товщиною $d = 200 - 2000 \text{ нм}$, були отримані методом термічного випаровування у вакуумі ($10^{-5} - 10^{-6} \text{ Па}$) кристалів SnTe легovanого 1 ат. % Sb, з подальшою конденсацією на поверхні (0001) слюди і ситалі, при температурі $125 - 300 \text{ }^\circ\text{C}$.

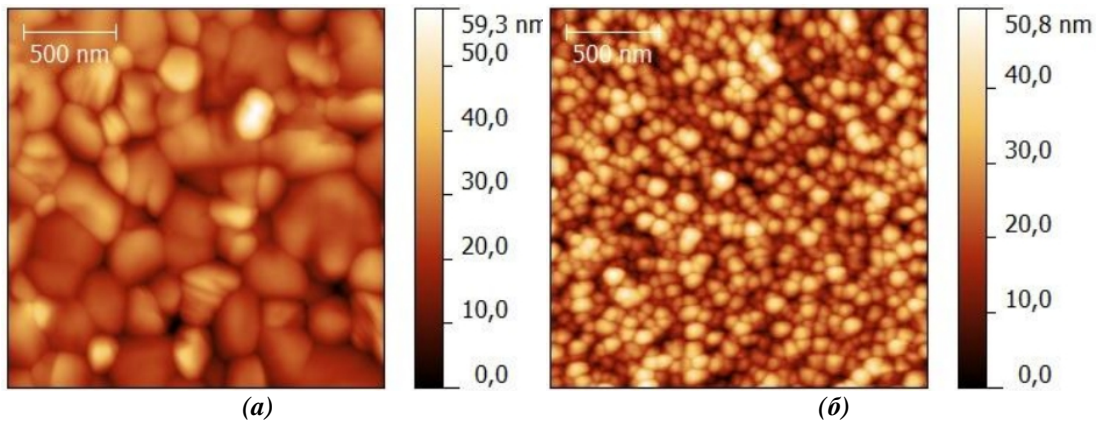


Рис. 1. АСМ- топограми плівок поверхні з товщиною d нм: (а) 200 і (б) 2000.

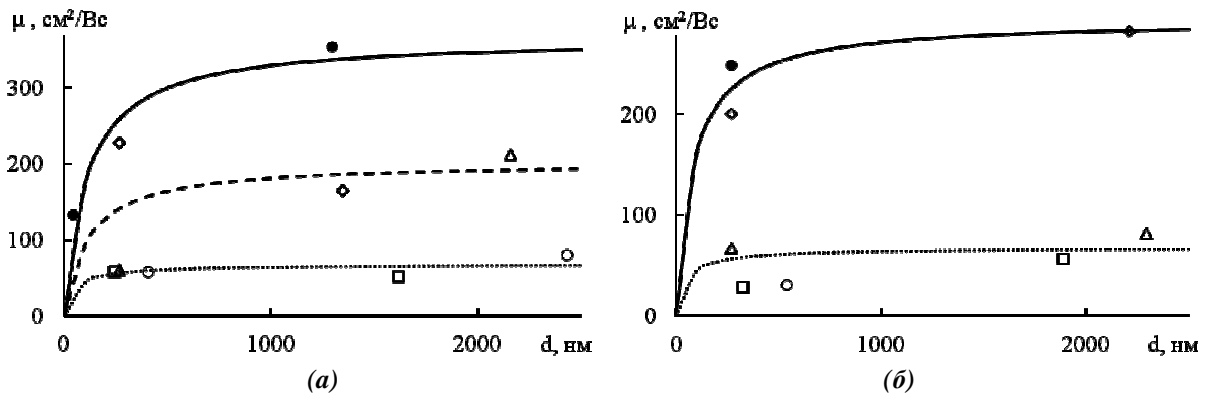


Рис. 2. Теоретичний розрахунок і експериментальні виміри залежності рухливості вільних носіїв μ в (а) слюди і (б) ситалі від товщини плівок, осаджених при температурі в $^{\circ}\text{C}$: 125 - \circ , 150 - \square , 200 - Δ , 250 - \bullet , 300 - \diamond .

Товщина d плівок контролювали за допомогою мікроінтерферометра МІИ-4. Морфологія поверхні та середня шорсткість були досліджені за допомогою атомно-силового мікроскопа (АФМ) Nanoscope 3a Dimension 3000, зображення були отримані на повітрі в контактному режимі.

Електрична провідність σ і коефіцієнт Холла R_H вимірювалися стандартним методом постійного струму з похибкою не більше 5%. Як матеріал для пайки контактів використовувався індій. Холлівську концентрацію носіїв заряду p розраховували виходячи з одного виду носіїв за формулою

$$p = \gamma / R_H e,$$

де Холла фактор $\gamma = 1$, e - заряд електрона. Холлівську рухливість μ_H розраховували як $\mu_H = R_H \sigma$. Тип носіїв заряду визначається знаком R_H .

Залежностях μ від товщини плівок були обчислені в рамках теорії Фукса-Зондгеймера з використанням Excel.

II. Результати

Вимірювання R_H показали, що плівки мають p -типу провідності у всьому діапазоні дослідженої товщини, так само, як $\text{SnTe} < \text{Sb} >$ кристал, який був використаний в якості для отримання плівок. Для кристала були отримані наступні значення кінетичних коефіцієнтів: $\sigma = 4600 \text{ (Ом} \cdot \text{см)}^{-1}$, $p = 4 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$, $\mu_H = 100 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Дірковий тип

провідності і високі значення концентрації носіїв є результатом від впровадження сурми в решітку SnTe та узгоджуються з даними, представленими в літературі [6].

Результати АСМ дослідження поверхні плівок наведені на рис. 1. Як видно, поверхня плівки має нерівності. Висота нерівностей була ≈ 50 нм, ширина в основі не перевищувала $200 \div 300$ нм для плівок з товщиною 200 нм і $20 \div 50$ нм для плівок з товщиною 2000 нм. Середня відстань між нерівностями дорівнювала ширині основи.

На рис. 2 наведено залежності μ від товщини плівок при кімнатній температурі.

Плавне зростання μ з товщиною в області $d > 200$ нм може бути пов'язано з проявом класичного розмірного ефекту. З огляду на високий ступінь виродження електронного газу в плівках, була зроблена спроба описати результати в рамках теорії Фукса-Зондгеймера.

В якості моделі, теорія Фукса-Зондгеймера розглядає метал зі сферичною поверхнею Фермі і ізотропною довжиною вільного пробігу носіїв l , що не залежить від товщини плівки d . Параметр дзеркальності p визначає частку електронів, пружно відбитих від поверхні, його значення рівні для обох поверхонь, незалежно від d , траєкторії і кута падіння електронів на поверхні. З повністю дифузним розсіянням $p = 0$, і з повністю дзеркальним $p = 1$. У наближенні тонких плівок ($d \sim l$) вираз для μ має вигляд [5]:

$$m_H = \frac{m_\infty}{1 + \frac{3}{8}(1-p)\frac{l}{d}}, \quad d \sim l \quad (1)$$

де m_∞ - це значення μ в зразку нескінченно великої товщини.

Використовуючи формулу (1), були побудовані теоретичні залежності $m(d)$ (рис. 2.) і значення $(1-p)l$ були визначені в результаті найкращого узгодження, що спостерігається між експериментальними даними та теоретичними кривими, через найменше значення середньоквадратичного відхилення.

Виявилось, що залежність $\mu(d)$ найкраще описується при $(1-p)l$, рівних 140 і 300 нм для температури слюдяної підкладки 125 - 150 і 200 - 300 °С відповідно. Слід зазначити, що для плівок, нанесених на ситал ці параметри дорівнюють 140 і 220 нм при тих же температурах. Видно, що розрахункові значення $(1-p)l$ в плівках SnTe<Sb> на ситалі виявилися трохи нижчими, ніж у плівках на слюді.

Висновки

Тонкі плівки SnTe легованого Sb р- типу провідності товщиною $d = 200 - 2000$ нм вирощували на слюді і ситалі методом термічного випаровування у вакуумі. Методом атомно-силової мікроскопії було встановлено, що поверхня має нерівності, зерниста структура не проявляється.

Збільшення μ з товщиною плівки в області $d > 200$ нм пояснюється проявом КлРЕ. Інтерпретацію залежностей $\mu(d)$ було дано в рамках теорії Фукса-Зондхаймер.

Встановлено, що ширини в основі об'єктів на поверхні плівки корелюють з довжинами вільного пробігу носіїв заряду.

Салій Я.П. – професор, доктор фізико-математичних наук, професор кафедри фізики і хімії твердого тіла.

- [1] D.M. Rowe, CRC Handbook of Thermoelectrics (CRC Press, Boca Raton, London, New York, Washington, 1995).
- [2] Yu.I. Ravich, B.A. Efimova, and I.A. Smirnov, Methods of Research on Semiconductors as Applied to Lead Chalcogenides PbTe, PbSe and PbS (Moscow: Nauka, 1968).
- [3] T.C. Harman, D.L. Spears, M.J.J. Manfra, J. Electron. Mater. 25, 1121 (1996).
- [4] T.C. Harman, D.L. Spears, and M.P. Walsh, J. El. Mater. 28, L1 (1999).
- [5] S.I. Menshikova, E.I. Rogacheva, A.Yu. Sipatov, S.I. Krivonogov, P.V. Matychenko, Journal of Thermoelectricity 2, 25 (2015).
- [6] Ya.P. Saliy, B.S. Dzundza, I.S. Bylina, O.B. Kostyuk, Journal of nano- and electronic physics 8(2), 02045 (2016).
- [7] Ya.P. Saliy, N.I. Bushkov, I.S. Bylina, V.I. Makovyshyn, Physics and chemistry of solid state 17(1),65 (2016).

Ya.P. Saliy

Classical size effects in Sb doped SnTe thin films

Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, Shevchenko Str., 57, Ivano-Frankivsk, 76018, Ukraine,
saliyyaroslav@gmail.com

The possibility of obtaining strongly degenerate ($> 4 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) SnTe thin films ($d = 200 - 2000$ nm) with p-type conductivity by thermal evaporation in vacuum of SnTe crystals doped with Sb, with subsequent condensation onto as (0001) mica and sital substrates, was established. The thickness dependences of electro-physical properties of thin films were obtained. In this region of thickness there was growth of the carrier mobility with thickness, which is attributable to manifestation of classical size effect and interpreted in the framework of Fuchs-Sondheimer theory. These measurements show little correlation between the length of free path of charge carriers and the lateral diameter of surface objects.

Key words: tin telluride, thin film, thickness, size effect.