

УДК 539, 234. 621. 239, 14

Д.М. Фреїк, І.В. Калитчук

Напрявлені неоднорідності в двошарових структурах на основі гетероепітаксійних плівок халькогенідів свинцю

*Прикарпатський університет імені Василя Стефаника,
вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ, 76000, Україна*

Досліджено профілі розподілу по товщині ефективних і локальних значень електричних параметрів як в епітаксійних плівках р-PbTe, n-PbS, так і в гетероструктурах на їх основі р-PbTe / n-PbS. Виявлено спрявлені неоднорідності пов'язані із дефектною підсистемою атомної структури. Показано, що методом епітаксії із парової фази формуються різкі n-p-гетеропереходи.

Ключові слова: тонкі плівки, метод гарячої стінки, телурид свинцю, сульфід свинцю, гетеропереходи, неоднорідності, профіль, дефекти.

Стаття постуила до редакції 21.11.2001; прийнята до друку 15.03.2002.

I. Вступ

Надгратки, сформовані на основі епітаксійних структур сполук $A^{IV}B^{VI}$, мають перспективне використання у приладних пристроях інфрачервоної техніки [1]. Властивості таких складних гетеросистем суттєвим чином залежать від неоднорідностей, що формуються у процесі росту її окремих елементів [2]. Так, зокрема, градієнт концентрації електрично активних дефектів атомної структури генерує своє електричне поле, яке відхиляє носії заряду, що рухаються до вільної поверхні плівки, границі розділу плівка-підкладка або гетероструктури. Це, у свою чергу, впливає на умови поверхневої рекомбінації носіїв заряду і, відповідно, робочі характеристики активних елементів мікроелектроніки [3]. У літературі, проте, є невелике число експериментальних робіт, присвячених вивченню природи неоднорідностей, та їх впливу на властивості плівок [2] і гетероструктур [4].

У даній роботі досліджено закономірнос-

ті формування неоднорідностей у епітаксійних плівках р-PbTe, n-PbS і в гетероструктурах на їх основі при вирощуванні з парової фази.

II. Методика експерименту

Плівки р-PbTe, n-PbS вирощувались з парової фази методом гарячої стінки на підкладках монокристалів BaF_2 із орієнтацією (111) [5]. Температура осадження складала $T_{II} = 420-620$ К, а випаровування – $T_{V} = 920$ К. Стінки реактора витримувались при температурі $T_C = 950$ К, що забезпечувало відсутність осадження пари при її переміщенні до зони осадження на підкладки. Товщину плівок задавали часом осадження пари.

Якість плівок оцінювали за даними рентгенівської двокристалльної рентгенографії, холлівських вимірів, а також профілями розподілу концентрації носіїв струму. Ви-

рошені плівки характеризувалися мозаїчною структурою із орієнтацією (111) $[1\bar{1}0]$ паралельно до (111) $[1\bar{1}0]$ BaF_2 . Розміри блоків мозаїки складали до 0,1-0,5 см.

Зразки для вимірювання ефекту Холла і електропровідності мали чотири холлівських і два струмових зонди. У якості омичних контактів використовували вольфрамову плівку. Виміри проводили при постійному струмі у постійному магнітному полі. Виключення впливу побічних гальвано- і термомагнітних ефектів при цьому забезпечували усередненням результатів вимірів при різних напрямках струму і магнітного поля. Похибка вимірів не перевищувала 5%. Ефективні значення сталої Холла (R_H) і питомої електропровідності знаходили за результатами вимірювань на плівках при їх пошаровому травленні хімічними методами [2].

Виміряні ефективні кінетичні параметри $\sigma(d)$, $R_H(d)$ пошаровостравлених до товщини d плівок подані на рис 1, а – 3, а.

Всі ефективні кінетичні парамет-

ри (рис 1, а - 3, а) є деякими інтегральними величинами і залежать від профілю розподілу концентрації носіїв заряду і питомої електропровідності, тобто локальних значень [6]. Ефективні електричні параметри плівок пов'язані з відповідними дійсними значеннями співвідношеннями:

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

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

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

Тут $\sigma(z)$, $R_H(z)$, $\mu(z)$ – дійсні значення питомої електропровідності, коефіцієнта Холла і холлівської рухливості на товщині z , а отже є функціями розподілу відповідних параметрів по товщині плівки; z – координата в напрямку нормалі до поверхні плівки ($z = 0$ відповідає границі розділу підкладка-

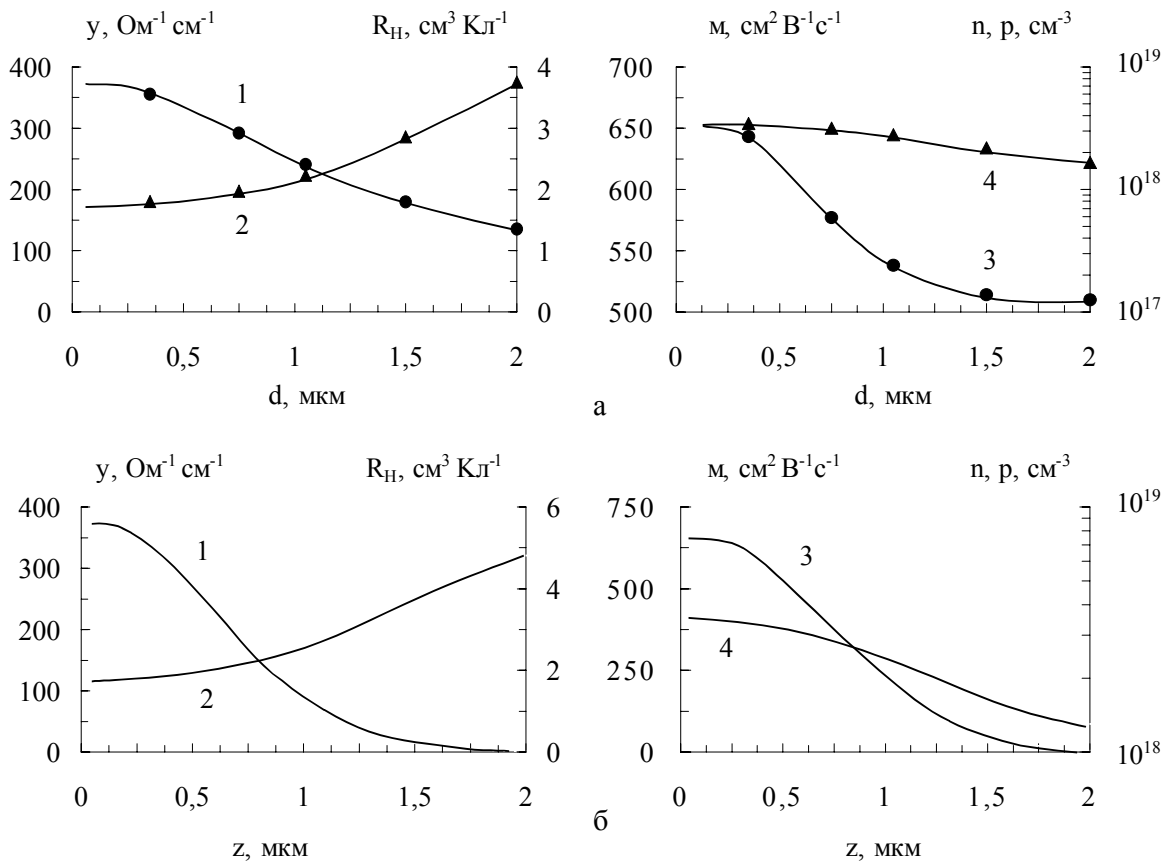


Рис. 1. Профілі розподілу ефективних (а) і локальних (б) значень електричних параметрів (σ -1, R_H -2, μ -3, n -4) епітаксійних плівок р-PbTe ($z = 0$ відповідає границі розділу підкладка-плівка).

плівка); d – товщина плівки. Елементарні шари dz плівки, як видно з формули (2), вносять вклад в інтегральне значення R_H , пропорційний їх коефіцієнту Холла і питомій електропровідності. При цьому їх внесок може бути різним у залежності від знаку

$R_H(z)$.

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

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

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

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

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

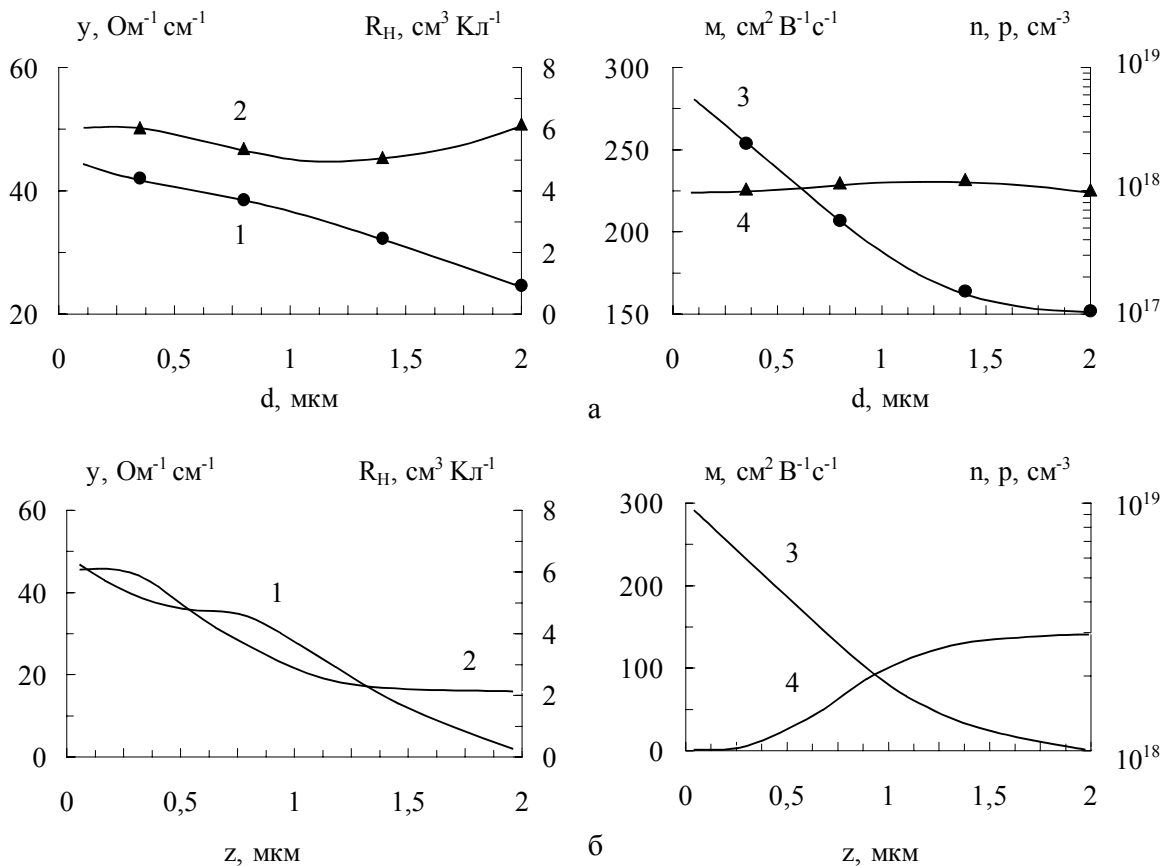


Рис. 2. Профілі розподілу ефективних (а) і локальних (б) значень електричних параметрів (σ -1, R_H -2, μ -3, n -4) епітаксійних плівок n -PbS ($z = 0$ відповідає границі розділу підкладка-плівка).

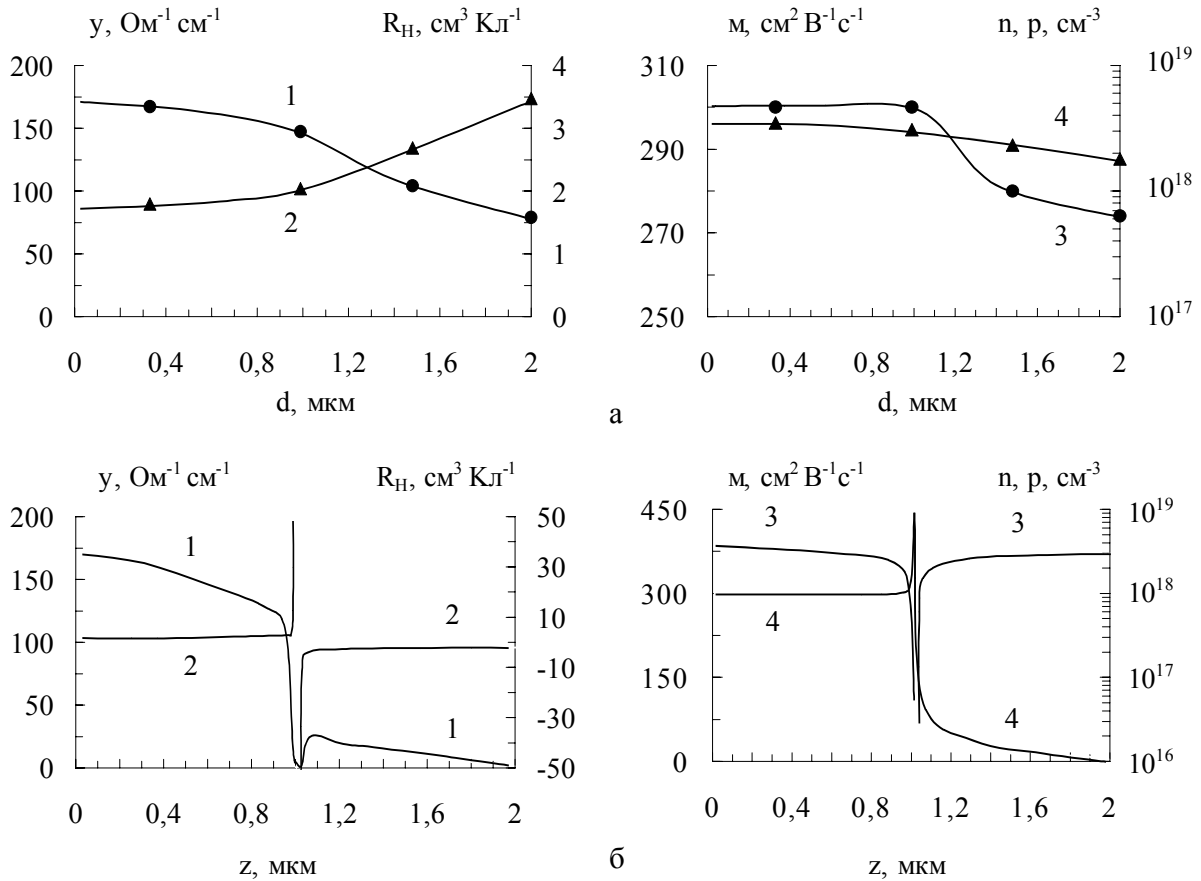


Рис. 3. Профілі розподілу ефективних (а) і локальних (б) значень електричних параметрів (σ -1, R_H -2, μ -3, n -4) гетероструктури p-PbTe / n-PbS ($d=2$ мкм, $d_{\text{PbTe}}=d_{\text{PbS}}$, $z=0$ відповідає границі розділу підкладки-плівка).

Тут $d_i \pm \Delta d/2$ – товщини плівок, які відрізняються внеском наступного елементарного шару; z – координата цього шару. Розраховані профілі розподілу провідності і коефіцієнта Холла, рухливості і концентрації носіїв струму по товщині плівок PbTe приведені на рис. 1, б-3, б.

III. Результати дослідження та їх аналіз

На основі аналізу профілів ефективних і локальних значень електричних параметрів (рис. 1, 2) видно, що плівки, вирощені при зазначених умовах істотно неоднорідні за товщиною. Так, зокрема, у плівках p-PbTe має місце зменшення як ефективної (рис. 1, а - крива 4), так і локальної (рис. 1, б - крива 4) значень концентрації дірок із збільшенням товщини (d) чи віддаленням від

підкладки (z) відповідно. Для плівок n-PbS спостерігається протилежна зміна концентрації електронів (рис. 2, а, б - криві 4). Рухливості як дірок (рис. 1, а, б - криві 3), так і електронів (рис. 2, а, б - криві 3) у плівках p-PbTe і n-PbS при цьому зменшуються.

При формуванні складної двошарової гетероепітаксійної гетероструктури p-PbTe / n-PbS (рис. 3) в області границі p-n-переходу при деякій незначній зміні ефективних значень (рис. 3, а), їх локальні електричні параметри змінюються досить різко (рис. 3, б). Так, спочатку у p-області біля границі p-n-переходу концентрація дірок зменшується, прямуючи до нуля, потім наступає конверсія типу провідності з p- на n-тип і у n-області має місце таке саме різке зростання електронів (рис. 3, б - криві 4). Холлівська рухливість носіїв струму змінюється поблизу межі p-n-переходу у протилежному напрямку до концентрації (рис. 3, б - криві 3). Слід за-

уважити, що ефективні значення сталої Холла у досліджуваній гетероструктурі при цьому не змінюють свого знаку, залишаючись додатною величиною по всьому профілю (рис. 3, а - крива 2).

Експериментальні результати (рис. 1-3) достатньо добре узгоджуються із моделлю реалізації єдиного фізико-хімічного процесу – збіднення конденсату на халькоген у напрямку від підкладки до поверхні плівки. Дійсно, згідно [7], вакансії халькогену у халькогенідах свинцю є ефективними донорами – V_{Te}^{2+} у р-PbTe і V_S^{2+} у n-PbS відповідно. Тому маємо компенсацію дірок у телуриді свинцю і зростання електронів у сульфіді свинцю при віддаленні від підкладки до вільної поверхні плівок (рис. 1, б; 2, б - криві 4). Процес збіднення на халькоген конденсату, в міру його росту, може бути обумовлений як фракціюванням складу шихти при її випаровуванні, так і зміною складу вже вирощених плівок при їх повільному післяростовому охолодженні у вакуумі при закритій заслінці. Це є можливим, так як згідно Р-Т-х-діаграми рівноваги бінарних систем Pb-Te, Pb-S [7] для заданих температур Т і складу х тверді PbTe і PbS перебувають у рівновазі із газовою фазою при певних значеннях парціальних тисків як сполук, так і чистик свинцю та халькогену. Так як тиски парів халькогену (P_{Te_2} , (P_{S_2})) значно пере-

вищують значення тиску інших складових, за умови експерименту (P_{Te_2} , $(P_{S_2}) \rightarrow 0$ (вакуум) буде мати місце збіднення на халькоген.

IV. Висновки

1. Досліджено розподіл за товщиною ефективних і локальних значень електричних параметрів для плівок р-PbTe і n-PbS, вирощених із парової фази.

2. Показано, що виявлені напрямлені неоднорідності у тонкоплівковому матеріалі, пов'язані із фракціюванням наважки у процесі росту плівок і процесами ревіпарування халькогену з їх поверхні за час післяростового охолодження.

3. Встановлено, що у гетероструктурах р-PbTe / n-PbS в області р-n-переходу має місце різка зміна локальних значень холлівських концентрації і рухливості носіїв заряду при відносно незначній зміні відповідних ефективних електричних параметрів.

Д.М. Фреїк – д.х.н., професор, директор Фізико-хімічного інституту, завідувач кафедри фізики твердого тіла;

І.В. Калитчук – аспірант кафедри фізики твердого тіла.

- [1] Н.Н.Берченко, К.Н.Гейман, Д.В.Матвеев. Методы получения р-n-переходов и барьеров Шоттки в халькогенидах свинца и твердых растворах на их основе // *Зарубежная электронная техника*, **14**, сс. 30-77 (1997).
- [2] 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).
- [3] Я.А.Федотов. Основы физики полупроводниковых приборов. Сов. Радио. Москва (1969).
- [4] О.А. Александрова, Р.Ц. Бондоков, И.В. Саунин, Ю.М. Таиров. Подвижность носителей заряда в двухслойных структурах PbTe/PbS. // *ФТП*, **32**(9), сс. 1064-1068 (1998).
- [5] Д.М. Фреїк, М.А. Галушак, Л.Й. Межиловская *Физика и технология тонких пленок*. Вища школа, Львов. 182с., (1988).
- [6] Petritz R.L. Theory of an experiment for measuring the mobility and density of carriers in the space-charge region of a semiconductor// *Phys. Rev*, **116**(6), pp. 1254-1256 (1958).
- [7] Д.М.Фреїк, В.В.Прокопів, М.О.Галушак, М.В.Пиц, Г.Д.Матеїк. *Кристалохімія і термодинаміка дефектів у сполуках $A^{IV}B^{VI}$* . Плаї, Івано-Франківськ (2000).

D.M. Freik, I.V. Kalytchuk

Directed of Heterogeneity in Two-Layer Structures on Basis of Heteroepitaxial Lead Chalkohenides Films

*Physics-Chemical Institute at the Vasyl Stefanyk Prekarpathian University
57, Shevchenko St., Ivano-Frankivsk, 76000, Ukraine, E-mail: freik@pu.if.ua*

The structures of distribution on thickness of effective and local value of electrical parameters as in p- PbTe, n- PbS epitaxial films, and in heterostructures on their basis p- PbTe / n- PbS are investigated. Are revealed directed to heterogeneity are connected from a defective subsystem of atomic structure. Is shown, that by method of epitaxial from a vapour phase are formed sharp n- p- heterojunctions.