

М.А. Лоп'янок, Р.І. Никируй, А.І. Ткачук

Парофазне осадження тонких плівок телуриду свинцю. I. Планування та оптимізація технології

Прикарпатський національний університет ім. В. Стефаника
76025, вул. Шевченка, 57, Івано-Франківськ, Україна, e-mail: freik@pu.if.ua

Методами математичного планування багатофакторних експериментів одержано рівняння регресії, які визначають залежність електричних параметрів епітаксійних плівок PbTe на сколах (111) BaF₂ від технологічних факторів вирощування з парової фази методом гарячої стінки. Визначено значення температур випаровування T_v, підкладки T_n та стінок камери T_c, при яких формуються тонкі плівки із оптимальними електричними параметрами.

Стаття постуила до редакції 05.04.2010; прийнята до друку 15.09.2010.

Вступ

Напівпровідники групи A^{IV}B^{VI} мають ряд унікальних властивостей [3,4], що дозволяє застосувати їх для виготовлення як фотоприймачів, так і лазерів спектрального діапазону 3-50 мкм [1,2]. Успіхи мікромініатюризації фотонної апаратури тісно пов'язані з використанням керованого епітаксійного вирощування тонких плівок. Не дивлячись на багаточисельні дослідження сполук A^{IV}B^{VI} [5-8], залишається до кінця не з'ясованим вплив умов вирощування на електричні параметри тонкоплівкового матеріалу.

В даній роботі за допомогою методу математичного планування багатофакторних експериментів [9,10] встановлено залежність електричних властивостей тонких плівок PbTe від технологічних факторів вирощування методом гарячої стінки.

I. Експеримент та обговорення результатів

Досліджувалися епітаксійні плівки PbTe, вирощені з парової фази методом гарячої стінки [7]. Підкладками служили свіжі сколи (111) кристалів BaF₂.

Швидкість осадження плівок складала 3-9 нм/с, а їх товщина 5-10 мкм.

Для опису залежності електричних параметрів тонких плівок від технологічних факторів методом математичного планування експерименту побудовані глобальні поліноміальні моделі в 3-факторному гіперпросторі. В якості факторів, що варіюються, (k = 3) вибрані температури підкладки (T_n), випарника (T_v) і стінок камери (T_c) технологічно

припустимі області зміни яких відповідно рівні:
473 K < T_n < 623 K, 758 K < T_v < 878 K,
833 K < T_c < 983 K. Параметрами оптимізації вибрані: рухливість носіїв заряду (μ), їх концентрація (n), коефіцієнт термо-е.р.с. (α), електропровідність (σ), характеристика термоефективності (α²σ), а також величина

$$Z = \frac{\mu}{\mu_{max}} + \left(\frac{n}{n_{min}}\right)^{-1} + \frac{(\alpha^2\sigma)}{(\alpha^2\sigma)_{max}}$$

де Z комплексний параметр оптимізації.

Вибір останнього параметру обумовлений необхідністю дослідників одержати тонкі плівки з максимальними значеннями μ_{max} і (α²σ)_{max} та мінімальними концентраціями n_{min}. Оптимізацію здійснювали для зведених значень

$$\mu' = \frac{\mu}{\mu_0}, \text{ де } \mu_0 = 10^4 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1},$$

$$n' = \frac{n}{n_0}, \text{ де } n_0 = 10^{17} \text{ см}^{-3},$$

$$\alpha' = \frac{\alpha}{\alpha_0}, \text{ де } \alpha_0 = 10^2 \text{ мкВ К}^{-1},$$

$$\sigma' = \frac{\sigma}{\sigma_0}, \text{ де } \sigma_0 = 10 \text{ см}^{-1} \text{ Ом}^{-1},$$

$$(\alpha^2\sigma)' = \frac{(\alpha^2\sigma)}{(\alpha^2\sigma)_0}, \text{ де } (\alpha^2\sigma)_0 = 10^{-6} \text{ мкВ}^2 \text{ см К}^{-2} \text{ Ом}^{-1}.$$

При описі залежності електричних параметрів тонких плівок від технологічних факторів адекватними виявилися моделі вже другого порядку. Границі адекватності моделей визначені кубом, вписаним у сферу планування: T_{n0} = 548 K, ΔT_n α = 75 K; T_{v0} = 818 K, ΔT_v α = 60 K; T_{c0} = 908 K, ΔT_c α = 75 K. Тут T_{i0} нульовий рівень варіювання факторів, α — величина зіркового плеча. Розрахунки проводились за допомогою IBM PC, АТ комп'ютера згідно методики [10]. Перевірку адекватності

гіпотетичних моделей та залежностей коефіцієнтів регресії здійснювали за критеріями Фішера та Стьюдента відповідно при 5% — рівні значущості [10].

Матриця планування експерименту наведена в табл. 1. Коефіцієнти регресії, оптимальні значення факторів, а також залежність параметрів оптимізації від технологічних факторів наведених в табл. 2-5, а також зображені на рис. 1-6.

Аналізуючи вплив технологічних факторів на електрофізичні параметри епітаксійних плівок PbTe, можна сформулювати наступні висновки: при фіксованій T_c з підвищенням температури підкладки і випарника спостерігається зменшення концентрації носіїв заряду, причому, чим вищі T_n і T_b , тим зменшення параметру n при відповідному зростанні T_b і T_c відбувається більш повільно. При високих значеннях технологічних факторів ($T_n > 573$ K, $T_b > 828$ K, $T_c > 943$ K) спостерігається зростання параметру оптимізації n (рис. 1), причому має місце сильний вплив трьох технологічних факторів. Внаслідок цього значення T_n , T_b і T_c при яких знайдений екстремальний мінімум концентрації носіїв заряду ($T_n = 567$ K, $T_b = 827$ K, $T_c = 939$ K), і є тими значеннями технологічних факторів, при яких спостерігається зміна залежності параметру оптимізації. Така ж за характером залежність між параметром n і факторами T_n , T_b і T_c спостерігається і тоді, коли фіксованою є температура підкладки (рис. 1) або температура випарника (рис. 1). Вона обумовлює існування при високих значеннях T_n , T_b і T_c (рис. 1) "хвоста" для концентрації носіїв заряду. Такий взаємозв'язок між технологічними факторами підтверджує ту думку, що між ними існує сильний ефект взаємодії, бо в рівнянні регресії всі три коефіцієнти b_{ij} — одного знаку і $|b_{ij}| < \Delta b_j$. Оскільки коефіцієнт $b_{22} < \Delta b_j$, то на зміну параметра n суттєво впливають температури T_n і T_c . Крім того, у рівнянні для концентрації (табл. 2,3) значущим виявився лише коефіцієнт b_{33} , тобто поверхня відгуку $n = f(T_n, T_b)$ при $T_c = \text{const}$ — майже площина (рис. 1).

Одночасний сильний вплив трьох технологічних факторів на значення концентрації носіїв заряду приводить до існування екстремуму всередині факторного простору (табл. 5).

Як видно з рівняння регресії (табл. 2,3) для рухливості носіїв заряду суттєву роль відіграють члени другого порядку, причому коефіцієнти b_{ij} — всі одного знаку. Це обумовлює існування екстремуму всередині факторного простору (рис. 2).

На електропровідність тонких плівок сильно впливають тільки T_b і T_c , а вплив T_n — незначний (рис. 3), тому що при фіксованій температурі підкладки ($T_n = 548$ K) і $T_b = 758$ K зростання T_c приводить до зменшення значення електропровідності. При збільшенні температури випарника і порівняно низьких температурах стінок камери ($T_c < 923$ K) значення електропровідності зменшується, але при подальшому зростанні температури $T_c > 923$ K електропровідність різко зростає (рис. 3). Однак при підвищенні T_n спостерігається незначне зменшення параметру σ

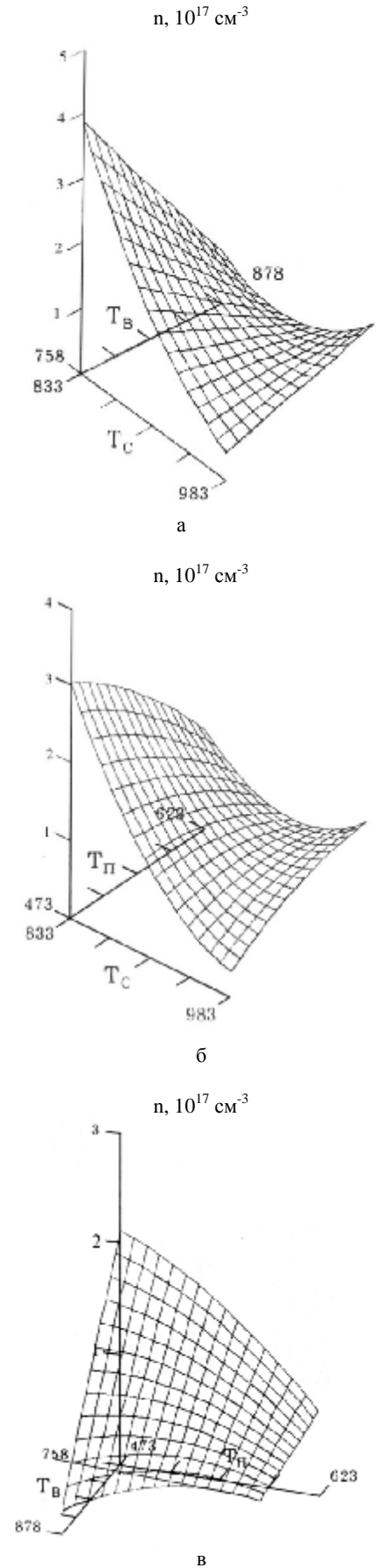


Рис. 1. Гіперповерхні відгуку для концентрації носіїв заряду в епітаксійних плівках PbTe/(111)BaF₂ при: а — $T_n = 548$ K; б — $T_b = 818$ K; в — $T_c = 908$ K.

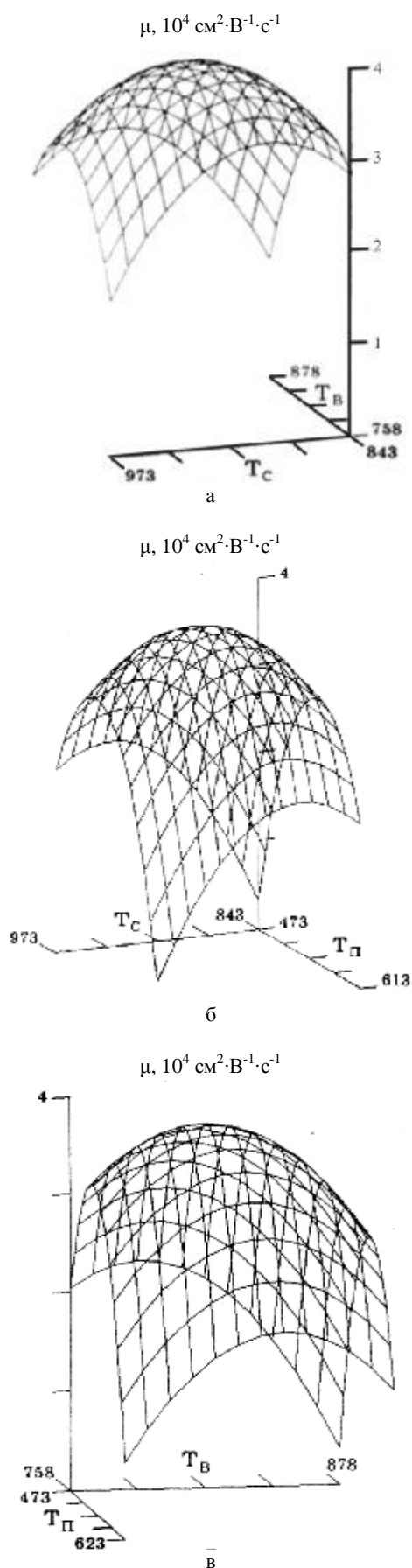


Рис. 2. Гіперповерхні відгуку для рухливості носіїв заряду в епітаксійних плівках $\text{PbTe}/(\text{III})\text{BaF}_2$ при: а — $T_{\text{П}} = 548 \text{ K}$; б — $T_{\text{В}} = 818 \text{ K}$; в — $T_{\text{С}} = 908 \text{ K}$.

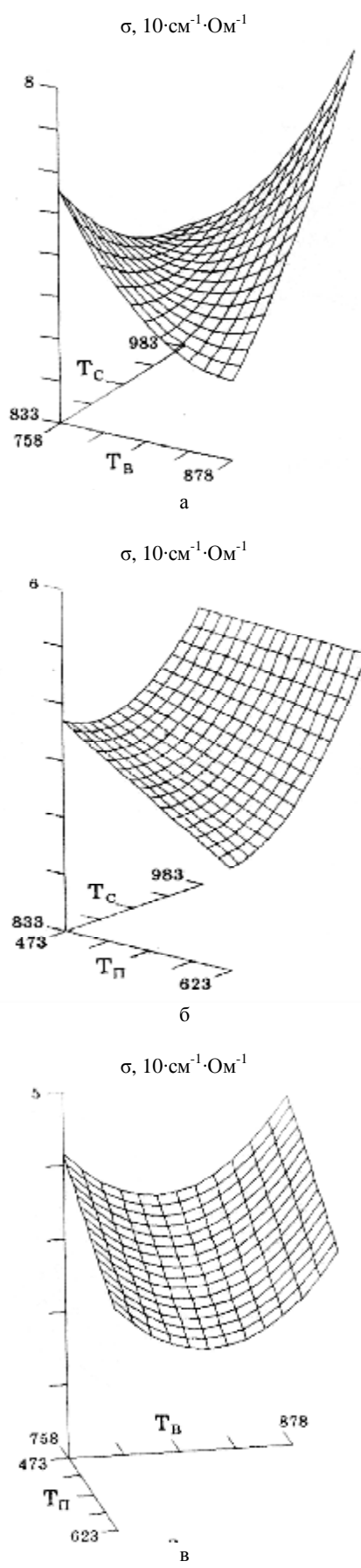


Рис. 3. Гіперповерхні відгуку для питомої електропровідності епітаксійних плівок $\text{PbTe}/(\text{III})\text{BaF}_2$ при: а — $T_{\text{П}} = 548 \text{ K}$; б — $T_{\text{В}} = 818 \text{ K}$; в — $T_{\text{С}} = 908 \text{ K}$.

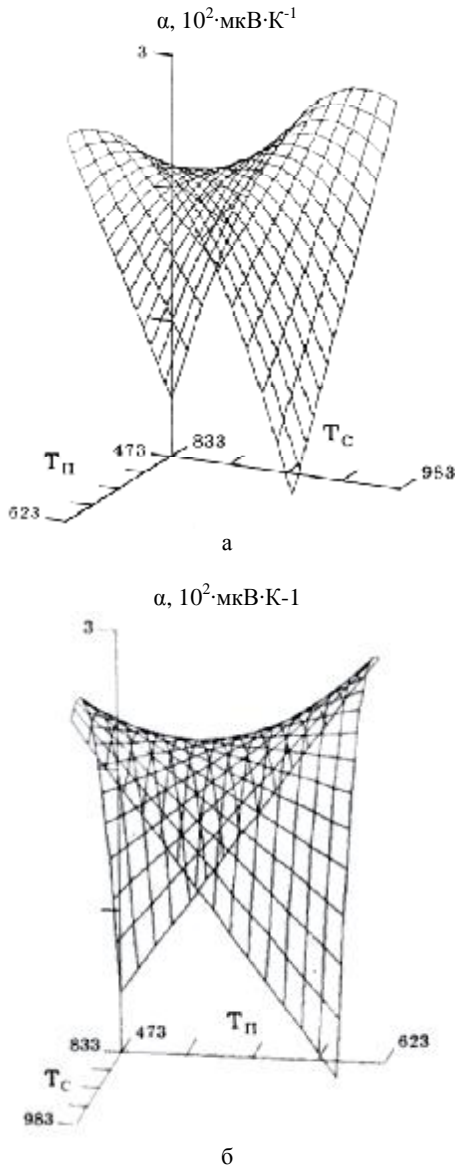


Рис. 4. Гіперповерхні відгуку для коефіцієнту термо-е.р.с. епітаксійних плівок PbTe/(III)BaF₂ при T_в, К: а – 758, б – 878.

(рис. 3). Можна стверджувати (рис. 3), що $\sigma = f(T_n, T_b, T_c)$ повністю визначається залежностями $n = f(T_n, T_b, T_c)$ і $\mu = f(T_n, T_b, T_c)$ при відповідно фіксованих значеннях T_n, T_b і T_c (рис. 1, 2). Завдяки такій закономірності екстремальне значення електропровідності знайдене на межі області планування.

Для параметру α в рівнянні регресії (табл. 2,3) коефіцієнти b_2, b_{12}, b_{23} і b_{22} виявились меншими за модулем від значення інтервалу довіри Δb_j . З цього можна зробити висновок, що температура випарника на величину коефіцієнта термо-е.р.с. за рівнянням регресії не впливає. Отже, знайти екстремальне значення для цього параметра неможливо. Для характеристики термоефективності з коефіцієнтів рівняння регресії b_2, b_{12}, b_{23} і b_{22} лише $|b_{23}| < \Delta b_j$, що говорить про взаємний вплив температур випаровування T_в і стінок камери T_c на зміну значення параметру $\alpha^2\sigma$ (рис. 5). При фіксованій T_c зміна T_в при зміні T_n на параметр оптимізації впливає

Таблиця 1

Матриця планування третього порядку при вирощуванні тонких плівок PbTe методом гарячої стінки на сколах (111) BaF₂ для трьох факторів (T_n — температура підкладок, T_в — температура випарника, T_c — температура стінок камери, підкладки) у всій області визначення цих факторів (T_n, К ∈ [473; 623]; T_в, К ∈ [758; 878]; T_c, К ∈ [833; 983])

| Фактори і параметри | Технологічні фактори | | | Зведені значення параметрів | | | | |
|---------------------------|----------------------|--------------------|--------------------|-----------------------------|----------|----------------------|----------|-------|
| | | | | Зведені рухливості | | Зведені концентрації | | |
| | T _n , К | T _в , К | T _c , К | μ' експ. | μ' розр. | n' експ. | n' розр. | |
| Планування 2 ³ | 1 | 503 | 783 | 863 | 2.720 | 2.791 | 2.980 | 2.835 |
| | 2 | 593 | 783 | 863 | 2.470 | 2.659 | 1.700 | 1.759 |
| | 3 | 503 | 853 | 863 | 1.500 | 1.651 | 1.230 | 1.209 |
| | 4 | 593 | 853 | 863 | 2.250 | 2.411 | 0.860 | 0.749 |
| | 5 | 503 | 783 | 953 | 3.060 | 3.057 | 0.800 | 0.775 |
| | 6 | 593 | 783 | 953 | 1.490 | 1.493 | 0.750 | 0.635 |
| | 7 | 503 | 853 | 953 | 2.850 | 2.817 | 0.760 | 0.565 |
| | 8 | 593 | 853 | 953 | 2.060 | 2.145 | 1.030 | 1.041 |
| Зіркові точки | 9 | 473 | 818 | 908 | 2.100 | 2.064 | 1.070 | 1.157 |
| | 10 | 623 | 818 | 908 | 1.570 | 1.388 | 0.700 | 0.653 |
| | 11 | 548 | 758 | 908 | 3.300 | 3.221 | 1.740 | 1.579 |
| | 12 | 548 | 878 | 908 | 2.950 | 2.811 | 0.660 | 0.553 |
| | 13 | 548 | 818 | 833 | 2.700 | 2.651 | 2.350 | 2.338 |
| | 14 | 548 | 818 | 983 | 2.820 | 2.651 | 0.800 | 0.851 |
| Нульові точки | 15 | 548 | 818 | 908 | 3.600 | 3.887 | 1.100 | 1.066 |
| | 16 | 548 | 818 | 908 | 3.990 | 3.887 | 0.940 | 1.066 |
| | 17 | 548 | 818 | 908 | 3.950 | 3.887 | 0.950 | 1.066 |
| | 18 | 548 | 818 | 908 | 4.080 | 3.887 | 1.140 | 1.066 |

$$\mu'_{\text{експ.}}, \mu'_{\text{розр.}} = \frac{\mu}{\mu_0}, \text{ де } \mu_0 = 10^4 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1};$$

$$n'_{\text{експ.}}, n'_{\text{розр.}} = \frac{n}{n_0}, \text{ де } n_0 = 10^{17} \text{ см}^{-3};$$

незначно (рис. 5). Підвищення температури підкладки в цьому випадку приводить до зменшення значення термоефективності $\alpha^2\sigma$. При фіксованих температурах випаровування і порівняно невисоких температурах стінок камери (T_c < 923 К) підвищення T_n приводить до зростання значень α та $\alpha^2\sigma$, а при порівняно високих (T_c > 923 К) — спостерігається протилежна залежність (рис. 4,5). Згідно з рис. 1-5 можемо стверджувати, що $\alpha^2\sigma = f(T_n, T_b, T_c)$ визначається характером залежностей $\alpha = f(T_n, T_b, T_c)$ і $\sigma = f(T_n, T_b, T_c)$ при відповідно фіксованих значеннях T_n, T_в і T_c, тому екстремальне значення параметру оптимізації знайдене на межі області планування.

Визначені на основі розрахунків оптимальні значення електрофізичних параметрів добре узгоджуються з експериментальними (табл.5). Неспівпадання областей факторного простору, що

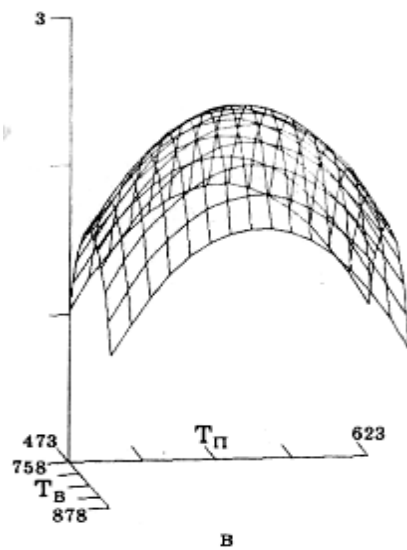
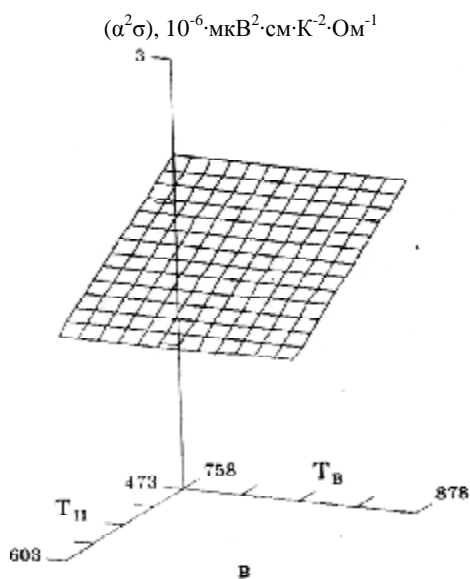
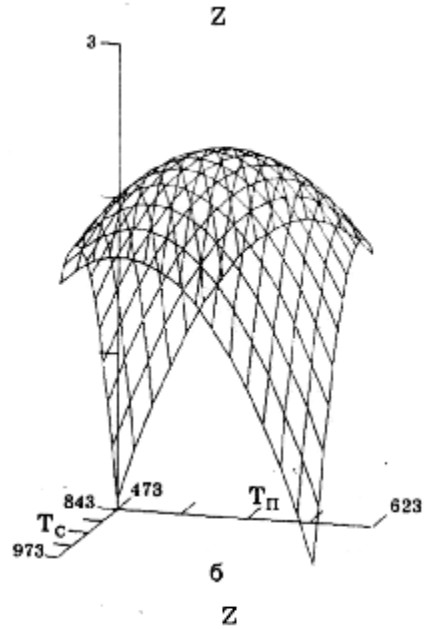
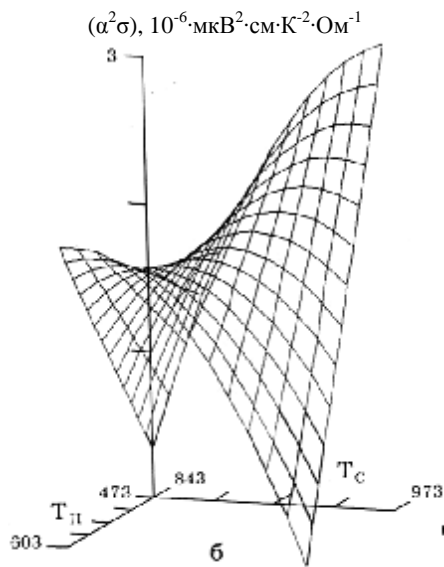
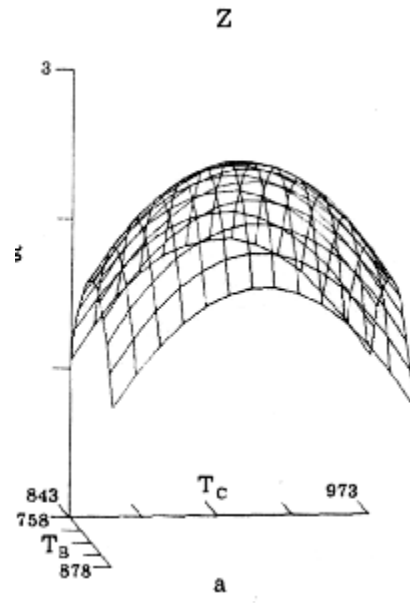
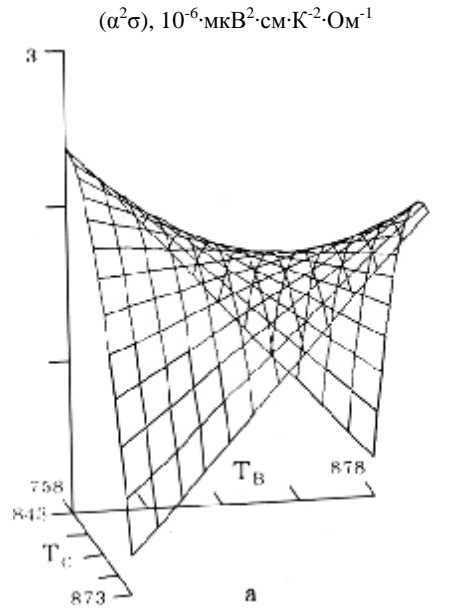


Рис. 5. Гіперповерхні відгуку для термоєфективності епітаксійних плівок $\text{PbTe}/(\text{III})\text{BaF}_2$ при: а - $T_{\text{II}} = 548$ К; б - $T_{\text{B}} = 818$ К; в - $T_{\text{C}} = 908$ К.

Рис. 6. Гіперповерхні відгуку для параметру Z епітаксійних плівок $\text{PbTe}/(\text{III})\text{BaF}_2$ при: а - $T_{\text{II}} = 548$ К; б - $T_{\text{B}} = 818$ К; в - $T_{\text{C}} = 908$ К.

Таблиця 2

Коефіцієнти рівнянь регресії гіперповерхонь відгуку електричних параметрів епітаксійних плівок PbTe, вирощених з парової фази методом гарячої стінки, в трьохфакторному просторі (T_n — температура підкладок, T_b — температура випарника, T_c — температура стінок камери, підкладки — сколи (111) BaF₂)

| Параметри оптимізації (зведені значення) | Коефіцієнти регресії | | | | | | | | | | Інтервал довіри Δb_j | Значення крит. Фішера | |
|--|----------------------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|------------------------------|-----------------------|------------------|
| | b_0 | b_1 | b_2 | b_3 | b_{12} | b_{13} | b_{23} | b_{11} | b_{22} | b_{33} | | розрах. F | таблич. $F_{кр}$ |
| μ' | 3,89 | -0,20 | -0,12 | 0,05 | 0,22 | -0,36 | 0,23 | -0,76 | -0,31 | -0,44 | 0,11 | 0,85 | 5,1 |
| n' | 1,07 | -0,15 | -0,31 | -0,44 | 0,15 | 0,23 | 0,35 | -0,06 | 0,05 | 0,19 | 0,06 | 1,12 | 5,1 |
| α' | 2,51 | -0,06 | -0,11 | -0,17 | 0,04 | -0,44 | 0,07 | -0,02 | -0,11 | -0,31 | 0,25 | 2,49 | 5,1 |
| σ' | 2,97 | -0,35 | 0,18 | 0,50 | 0,01 | 0,16 | 0,77 | 0,02 | 0,31 | 0,24 | 0,11 | 4,50 | 5,1 |
| $(\alpha^2 \sigma)'$ | 1,90 | -0,26 | -0,20 | 0,01 | -0,06 | -0,59 | 0,43 | -0,01 | -0,06 | -0,28 | 0,22 | 2,68 | 5,1 |
| Z | 2,53 | -0,10 | 0 | 0,15 | 0,01 | -0,35 | 0,12 | -0,30 | -0,23 | -0,38 | 0,20 | 3,15 | 5,1 |

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{33} \cdot x_3^2,$$

$$\text{де } x_1 = \frac{(T_n - 548) \text{ К}}{45 \text{ К}}, x_2 = \frac{(T_b - 818) \text{ К}}{35 \text{ К}}, x_3 = \frac{(T_c - 908) \text{ К}}{45 \text{ К}}.$$

Таблиця 3

Рівняння регресії, що описують залежність електрофізичних параметрів епітаксійних плівок PbTe, вирощених методом гарячої стінки, від технологічних факторів (T_n — температура підкладок, T_b — температура випарника, T_c — температура стінок камери) у кодованому вигляді (підкладки — сколи (111) BaF₂)

| Параметри оптимізації | Рівняння регресії | Кодовані значення факторів |
|---|---|---|
| Рухлив. носіїв заряду μ' | $3,89 - 0,20 x_1 - 0,12 x_2 + 0,22 x_1 x_2 - 0,36 x_1 x_3 + 0,23 x_2 x_3 - 0,76 x_1^2 - 0,31 x_2^2 - 0,44 x_3^2;$ | $x_1 = \frac{(T_n - 548) \text{ К}}{45 \text{ К}},$ $x_2 = \frac{(T_b - 818) \text{ К}}{35 \text{ К}},$ $x_3 = \frac{(T_c - 908) \text{ К}}{45 \text{ К}}.$ |
| Концентр. носіїв заряду n' | $1,07 - 0,15 x_1 - 0,31 x_2 - 0,44 x_3 + 0,15 x_1 x_2 + 0,23 x_1 x_3 + 0,35 x_2 x_3 - 0,06 x_2^2 + 0,19 x_3^2;$ | |
| Коефіцієнт термо — е.р.с. α' | $2,51 - 0,44 x_1 x_3 - 0,31 x_3^2;$ | |
| Електропровідність σ' | $2,97 - 0,35 x_1 + 0,18 x_2 + 0,50 x_3 + 0,16 x_1 x_3 + 0,77 x_2 x_3 + 0,31 x_2^2 + 0,24 x_3^2;$ | |
| Характеристика термоэффектив $(\alpha^2 \sigma)'$ | $1,90 - 0,26 x_1 - 0,59 x_1 x_3 + 0,43 x_2 x_3 - 0,28 x_3^2;$ | |
| Z | $2,53 - 0,35 x_1 x_3 - 0,30 x_1^2 - 0,23 x_2^2 - 0,38 x_3^2;$ | |

$$\mu' = \mu(10^4 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}), n' = n(10^{17} \text{ см}^{-3}), \alpha' = \alpha(10^2 \text{ мкВ К}^{-1}), \sigma' = \sigma(10 \text{ см}^{-1} \text{ Ом}^{-1}),$$

Таблиця 4

Рівняння регресії, що описують залежність електричних параметрів епітаксійних плівок PbTe від технологічних факторів їх вирощування з парової фази методом гарячої стінки (T_n — температура підкладки, T_b — температура випарника, T_c — температура стінок камери) у явному вигляді (підкладки — сколи (111) BaF₂)

| Параметри оптимізації | Рівняння регресії |
|--|--|
| $\mu, \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ | $-3,687 \cdot 10^6 + 4,537 \cdot 10^3 T_n + 2,005 \cdot 10^3 T_b + 3,719 \cdot 10^3 T_c + 1,416 \cdot 10^0 T_n T_b - 1,768 \cdot 10^0 T_n T_c + 1,429 \cdot 10^0 T_b T_c - 3,773 \cdot 10^0 T_n^2 - 2,514 \cdot 10^0 T_b^2 - 2,158 \cdot 10^0 T_c^2;$ |
| $n, \text{ см}^{-3}$ | $3,549 \cdot 10^{19} - 1,574 \cdot 10^{16} T_n - 2,664 \cdot 10^{16} T_b - 4,247 \cdot 10^{16} T_c + 9,778 \cdot 10^{12} T_n T_b + 1,156 \cdot 10^{13} T_n T_c + 2,248 \cdot 10^{13} T_b T_c - 2,815 \cdot 10^{12} T_n^2 + 9,235 \cdot 10^{12} T_b^2;$ |
| $\alpha, \text{ мкВ К}^{-1}$ | $-2,318 \cdot 10^4 + 1,973 \cdot 10^1 T_n + 3,917 \cdot 10^1 T_c - 2,173 \cdot 10^2 T_n T_c - 1,531 \cdot 10^2 T_c^2;$ |
| $\sigma, \text{ см}^{-1} \text{ Ом}^{-1}$ | $6,624 \cdot 10^3 - 7,952 \cdot 10^1 T_n - 8,528 \cdot 10^0 T_b - 6,473 \cdot 10^0 T_c + 7,901 \cdot 10^4 T_n T_c + 4,889 \cdot 10^3 T_b T_c + 2,531 \cdot 10^3 T_b^2 + 1,185 \cdot 10^3 T_c^2;$ |
| $(\alpha^2 \sigma), \text{ мкВ}^2 \text{ см К}^{-2} \text{ Ом}^{-1}$ | $-5,113 \cdot 10^5 + 2,588 \cdot 10^7 T_n - 2,479 \cdot 10^7 T_b + 1,874 \cdot 10^7 T_c - 2,914 \cdot 10^{10} T_n T_c + 2,730 \cdot 10^{10} T_b T_c - 1,383 \cdot 10^{10} T_c^2;$ |
| Z | $-4,083 \cdot 10^2 + 3,193 \cdot 10^1 T_n + 3,072 \cdot 10^1 T_b + 4,355 \cdot 10^1 T_c - 1,728 \cdot 10^4 T_n T_c - 1,481 \cdot 10^4 T_n^2 - 1,878 \cdot 10^4 T_b^2 - 1,877 \cdot 10^4 T_c^2;$ |

Таблиця 5

Оптимальні значення електрофізичних параметрів епітаксійних плівок PdTe та технологічних факторів під час їх вирощування з парової фази методом гарячої стінки (підкладки — сколи (111) BaF₂)

| Параметри оптимізації | Оптимальні значення | | | |
|--|---------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|
| | Фактори | | | Параметри |
| | T _п , К | T _в , К | T _с , К | Ŷ |
| μ , см ² В ⁻¹ с ⁻¹ | 540 | 809 | 908 | 3,85·10 ⁴ |
| n , см ⁻³ | 567 | 827 | 939 | 8,60·10 ¹⁶ |
| α , мкВ К ⁻¹ | — | — | — | — |
| σ , см ⁻¹ Ом ⁻¹ | 473 | 878 | 983 | 80,4 |
| $(\alpha^2 \sigma)$, мкВ ² см К ⁻² Ом ⁻¹ | 473 | 878 | 983 | 43,3·10 ⁻⁶ |
| Z | 549 | 818 | 908 | 2,53 |

відповідають оптимальним значенням параметрів μ , n , α , σ і $\alpha^2 \sigma$ (табл. 5), підтверджує доцільність вибору параметру Z для оптимізації технологічного процесу. З рівняння для Z, (табл.4; 5) видно, що в технології вирощування епітаксійних плівок телуриду свинцю більш суттєву роль відіграють температури підкладки і стінок камери.

Слід зауважити, що при всіх значеннях технологічних факторів, що використовуються, тонкі плівки телуриду свинцю мають електронний тип провідності. Як відомо [11], електричні параметри нелегованих кристалів халькогенідів свинцю визначаються концентрацією електрично активних власних дефектів, пов'язаних з відхиленням складу від стехіометричного. Так в телуриді свинцю діркова провідність обумовлена переважанням вакансій у підгратці металу (нестача свинцю), а електронна — атомами металу в міжвузлях (надлишок свинцю) [11]. Також відомо [6], що при всіх реалізованих технологічних умовах коефіцієнт конденсації телуру $\alpha_{Te_2} \approx 0$, тоді як коефіцієнт конденсації Pb і PbTe відмінні від нуля. Тому складаються сприятливі умови для формування плівок телуриду свинцю з надлишком металу, тобто n-типу провідності. Підвищення температури підкладок до T_п < 573 К значно зменшує коефіцієнт конденсації свинцю [6], що обумовлює його нестачу в конденсаті і спостережуване зменшення концентрації електронів (рис. 1) Зростання концентрації електронів в області високих значень технологічних факторів може бути пов'язане як зі зростанням кількості атомів свинцю у міжвузлях, так і, що більш ймовірно, зі збільшенням кількості вакансій халькогена.

Параболічний характер $\mu = f(T_v, T_c)$, $\mu = f(T_n, T_c)$, і $\mu = f(T_n, T_v)$ при T_п, T_в і T_с = const відповідно, обумовлений зміною ступеня структурної досконалості і концентраційною залежністю рухливості носіїв заряду (рис. 2, табл. 2-4). При низьких температурах підкладок (T_п = 473 К) як і значних температурах випаровування (T_в > 823 К) і стінок камери (T_с > 913К), внаслідок значного відхилення умов росту від термодинамічно рівноважних, утворюється структурно-дефектний

матеріал з низькими значеннями рухливості. При оптимальних технологічних умовах (T_п = 540 К, T_в = 809 К, T_с = 908 К) епітаксійні плівки характеризуються високими структурними параметрами і відповідно великими значеннями рухливості носіїв заряду.

Параболічний характер залежності μ від технологічних факторів T_п, T_в і T_с значно впливає на характер залежності параметру оптимізації Z від технологічних факторів T_п, T_в і T_с (рис. 6). При оптимальних технологічних умовах (T_п = 549 К, T_в = 818 К, T_с = 908 К центр факторного простору) (табл. 5.) параметр Z набуває оптимального значення, а епітаксійні плівки (враховуючи концентраційну залежність рухливості носіїв заряду) характеризуються порівняно низькими (в даному дослідженні) концентраціями ($n = 8.6 \cdot 10^{16}$ см⁻³) і, відповідно, великими значеннями рухливості ($\mu \approx 4 \cdot 10^4$ см² В⁻¹ с⁻¹) носіїв заряду.

Висновки

1. З використанням методу математичного планування багатофакторних експериментів для оптимізації способу вирощування епітаксійних плівок PbTe з парової фази на підкладках зі сколів (111) BaF₂ одержані рівняння регресії, що визначають залежність їх електричних параметрів від технологічних факторів вирощування з парової фази методом гарячої стінки.

2. Встановлено, що для рухливості та концентрації носіїв заряду в рівняннях регресії суттєву роль відіграють члени другого порядку, причому для рухливості коефіцієнти b_{ij} а для концентрації носіїв заряду коефіцієнти b_{ij} - всі одного знаку. Це обумовлює існування екстремальних значень даних параметрів в середині факторного простору. Для концентрації носіїв заряду значущим виявився тільки коефіцієнт b_{33} , що є причиною того, що поверхня відгуку $n = n(T_n, T_v)$ при T_с=const - майже площина.

3. Визначено, що при всіх значеннях технологічних факторів епітаксійні плівки PbTe

мають електронний тип провідності. Початкове підвищення $T_n = 473-623$ К, як і $T_b = 758-878$ К та $T_c = 833-983$ К приводить до зменшення концентрації електронів, а при певних їх значеннях спостерігається зміна характеру залежності параметру оптимізації n та T_n , T_b і T_c обумовлює існування розрахованого мінімального значення параметру ($n = 8,6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) всередині факторного простору ($T_n = 567$ К, $T_b = 827$ К, $T_c = 939$ К).

З'ясовано, що на зміну параметрів n і μ сильний відбиток накладає ефект міжфакторної взаємодії, хоча більш суттєву роль в зміні цих параметрів відіграють T_n і T_c .

4. Показано, що $\sigma = f(T_n, T_b, T_c)$ та $\alpha^2 \sigma = f(T_n, T_b, T_c)$ повністю визначається характером залежностей $n = f(T_n, T_b, T_c)$ і $\mu = f(T_n, T_b, T_c)$. Експериментальні значення α і $\alpha^2 \sigma$ знайдені на межі області планування.

5. Зроблено припущення, що параболічний характер залежності $\mu = f(T_n, T_b, T_c)$ значно впливає на характер залежності параметру оптимізації Z . При оптимальних технологічних умовах ($T_n = 549$ К, $T_b = 818$ К, $T_c = 908$ К - центр факторного простору)

параметр Z набуває екстремального значення, а епітаксійні плівки РbТе (враховуючи концентраційну залежність рухливості носіїв заряду) характеризуються низькими концентраціями ($n \leq 10^{17} \text{ см}^{-3}$) і, ($\mu \approx 4 \cdot 10^4 \text{ см}^2 \text{ V}^{-1} \text{ с}^{-1}$) носіїв заряду.

Автори висловлюють вдячність професору Фреїку Д.М. за постановку задач дослідження та обговорення їх результатів.

Робота виконується згідно наукового проекту МОНУ (державний реєстраційний номер 0109U001414) та ДФФД МОНУ (державний реєстраційний номер (0109U004505), НАН України (проект в рамках програми «Фундаментальні проблеми наноструктурних систем, наноматеріалів, нанотехнологій», договір № 13/10-Н).

Лоп'янюк М.А. – кандидат фізико-математичних наук, доцент;
Никируй Р.І. – аспірант кафедри фізики і хімії твердого тіла;
Ткачук А.І. – старший лаборант.

- [1] Ф.Ф. Сизов // *Зарубежн. електрон. Техника*, (4), сс. 31-48, (1977).
- [2] И.М Раренко, Д.М. Фреик // *Полупроводниковые материалы и приборы инфракрасной техники*, Черновцы, ЧГУ, с. 98, (1980).
- [3] Н.И. Бойкин, С.А. Кутопин // *Обзоры по электронной технике. Микроэлектроника*, 1(615), сс. 3-67 (1979).
- [4] Н.Н. Берченко, Д.Ш. Зарадзе, А.В. Матвеенок // *Зарубеж. електрон, техніка*, (4), сс. 34-52 (1979).
- [5] J.N. Zemel // *J. Luminescence*, 7(1), pp. 524-541 (1973).
- [6] Д.М. Фреик, М.А. Гааушак, Л.И. Межиловская // *Физика и технология полупроводниковых плёнок*, Вища школа, Львов, 152 с. (1988).
- [7] Д.М. Фреик // *Неорган. материалы*, Изв. АН СССР, 18(8), сс. 1237-1248 (1982).
- [8] Д.М. Фреик // *Приборы и техн. эксперимента*. (5), сс. 7-17 (1976).
- [9] Ю.П. Адлер. Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский // *Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий*, Наука, М. 282 с. (1971).
- [10] В.В. Налимов, Н.А. Чернова // *Статистические методы планирования эксперимента*, Наука, М. 132 с. (1965).

М.А. Lopyanko, R.I. Nykyruy, A.I. Tkachuk

Vapor-Phase Deposition of Lead Telluride Thin Films. I. Technology Planning and Optimization

Vasyl Stefanyk PreCarpathian National University
 57, Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk, 76025, Ukraine, E-mail: freik@pu.if.ua

The regression equations obtained by methods of mathematical planning of multifactor experiments that determine dependence of electrical parameters of PbTe epitaxial films on chips (111) BaF₂ due growing technological factors by hot wall method from vapor-phase. There are determined the temperature evaporation T_b substrate T_n and chamber walls T_c , which thin films with optimum electrical parameters are formed.