

УДК 621.382.3:621.383

Залежність фотопараметрів резисторів на основі шарів n-PbTe від технологічних факторів їх одержання

А.М. Добровольська*, В.М. Чобанюк**, І.М. Раренко***

*Івано-Франківська державна медична академія, вул. Галицька, 2, м. Івано-Франківськ, 76000, Україна

**Прикарпатський університет ім. В. Стефаника, вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ, 76000, Україна

***Чернівецький державний університет ім. Ю. Федьковича, вул. Коцюбинського 2, м. Чернівці, 56000, Україна

Метою даної роботи є дослідження впливу технологічних факторів вирощування епітаксійних шарів n-PbTe з парової фази методом гарячої стінки на основні фотоелектричні параметри резисторів, виготовлених на їх основі, а також знаходження значень технологічних факторів, при яких досліджувані параметри набувають оптимальних значень.

Ключові слова: тонкі шари, технологічні фактори, температура, підкладка, випарник, стінка камери, фотоприймач, резистор, параметри, оптимізація.

Стаття поступила до редакції 24.03.2000; прийнята до друку 25.05.2000.

1. Типові фотоприймальні елементи, а саме фоторезистори (ФР), формувались на вихідних епітаксійних шарах n-PbTe, вирощених з парової фази методом гарячої стінки (технологічними факторами були: температура підкладок (T_{Π}): $503 \text{ K} \leq T_{\Pi} \leq 593 \text{ K}$; температура випарника ($T_{\text{В}}$): $783 \text{ K} \leq T_{\text{В}} \leq 853 \text{ K}$; температура стінок камери ($T_{\text{С}}$): $863 \text{ K} \leq T_{\text{С}} \leq 953 \text{ K}$), коли підкладками були свіжі сколи (111) кристалів BaF_2 ; швидкість осадження шарів складала 3-9 нм, а їх товщина – 5-10 мкм.

З метою безпосередньої оцінки застосування методу гарячої стінки для одержання епітаксійних шарів n-PbTe, придатних для виготовлення фотоприймачів, що потребує мінімальну кількість додаткових термічних операцій, фотоприймальні майданчики фоторезисторів формувались у більшості випадків тих самих розмірів, а саме $S=50 \cdot 50 \text{ мкм}^2$, при цьому застосовувались стандартні фотолітографічні методи. Для того, щоб

зменшити вплив електричних контактів, їх площа в деяких випадках у 3-5 разів перевищувала опромінювану площу.

Для формування фоторезисторів були створені комплекти металевих масок; для створення електричних контактів на n-область осаджували індій електрохімічним шляхом. Фоторезистори формувались на одержаних шарах n-PbTe без додаткової термічної обробки. В основу виготовлення фоторезисторів було покладено етапи, описані в [1].

Для вимірювання параметрів і характеристик було застосовано універсальну вимірювальну установку К-54 й універсальну напівавтоматичну терморегулюючу установку, яка забезпечила стабільність потоку випромінювання на рівні $\pm 1\%$. Тип джерела випромінювання вибирався у відповідності до вимог стандартів і технічних умов для фоторезисторів.

Інтегральна вольт-ватна чутливість

визначалась за формулою

$$R_V = \frac{U_c}{\Phi_1}, \quad (1)$$

де $\Phi_1 = \Phi \beta$ – діюче значення потоку випромінювання, β - коефіцієнт форми модуляції і $\beta=0.325$, Φ – потік модульованого випромінювання на всю площадку фоторезистора.

Питому виявну здатність визначали за формулою

$$D^* = \frac{R_V}{U_{ш}} \sqrt{A \cdot \Delta f} = \frac{U_c \sqrt{A \cdot \Delta f_{\text{еф.}}}}{U_{ш} \cdot \Phi_1}, \quad (2)$$

де A – площа фотоприймача, $\Delta f_{\text{еф.}}$ – ефективна шумова смуга пропускання вимірювального тракту.

Частотна характеристика визначалась з метою виявлення переважаючого шуму. Вимірювання напруги шуму ($U_{ш}$) і напруги фотосигналу (U_c) проводилось у широких межах частот як з АЧТ і модулятором, так і при використанні лазера. Для кожного значення частоти f_i за формулою

$$U_{ш_i} = \frac{U_{ш_i}}{\sqrt{\Delta f_{\text{еф.}_i}}} \quad (3)$$

визначали спектральну густину напруги шуму і будували частотні характеристики $U_{ш_{\text{еф.}}} = \varphi(f)$. Для довільної f визначали $U_{ш}$, D^* .

Напругу шуму фоторезистора визначали за формулою

$$U_{ш} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2}, \quad (4)$$

де U_1 - рівень власних шумів установки, який вимірювали не подаючи на фотоприймач напругу живлення або при підключенні на вхід малOSHумлячого еквівалента опору, а U_2 – сумарна напруга шумів установки і фотоприймача при попаданні на фотоприймач напруги живлення.

Значення відносної спектральної чутливості фоторезисторів R_λ на довжині хвилі випромінювання λ_{max} визначали за формулою

$$R_V = \frac{n_\lambda \cdot m_{\lambda_{\text{max}}}}{m_\lambda \cdot n_{\lambda_{\text{max}}}}, \quad (5)$$

де n_λ і m_λ – показання приладу, що реєструє сигнал у колі фотоприймача й

отестованого приймача випромінювання; $n_{\lambda_{\text{max}}}$ і $m_{\lambda_{\text{max}}}$ - показання приладу, що реєструє сигнал у колі фотоприймача й отестованого приймача випромінювання при максимумі відносної спектральної характеристики досліджуваного фотоприймача. На основі одержаних результатів будувались графіки залежності відносної спектральної чутливості від довжини хвилі випромінювання – $R_\lambda = f(\lambda)$, за якими визначалось розташування короткохвильової і довгохвильової межі чутливості фоторезисторів на рівні 0.1 від максимуму. Враховуючи температурну залежність спектральної чутливості, вимірювання проводились з розташуванням фотоприймачів в азотному кріостаті, де їх температура підтримувалась з точністю ± 3 К. Вимірювання проводились з використанням призми NaCl без доступу розсіяного випромінювання.

2. З метою опису залежності параметрів фоторезисторів, виготовлених на основі тонких шарів n-PbTe, вирощених методом гарячої стінки, від технологічних факторів одержання даних матеріалів, дослідження проводили, використовуючи метод математичного планування багатofакторних експериментів [2,3], за схемою повного експерименту 2^k , де $k=3$. В якості гіпотетичної було вибрано квазіквдратичну модель з урахуванням міжфакторної взаємодії.

За допомогою використаного методу побудовано глобальні поліноміальні моделі в 3-

факторному гіперпросторі. Факторами, що варіювались ($k=3$), було вибрано температуру підкладки ($T_{\text{п}}$), випарника ($T_{\text{в}}$) і стінок камери ($T_{\text{с}}$), на технологічно допустимі області зміни яких вказано в п.1.

Параметрами оптимізації було вибрано виявну здатність фоторезистора D_λ^* , його

вольт-ватну чутливість R_V і напругу шумів $U_{ш}$. Оптимізацію здійснювали для зведених значень обраних параметрів, а саме:

$$D_{\lambda}' = D_{\lambda}^*/D_{\lambda_0}^*, \text{ де } D_{\lambda_0}^* = 10^9 \text{ смГц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1};$$

$$R_V' = R_V/R_{V_0}, \text{ де } R_{V_0} = 10^2 \text{ В/Вт};$$

$$U_{\text{ш}}' = U_{\text{ш}}/U_{\text{ш}_0}, \text{ де } U_{\text{ш}_0} = 10^{-10} \text{ В}.$$

Оскільки під час опису залежності параметрів фоторезисторів, виготовлених на основі епітаксійних шарів n-PbTe, від технологічних факторів вирощування цих тонкошарових матеріалів, адекватною виявилась модель вже другого порядку, то межі адекватності було визначено кубом, вписаним у сферу планування: $T_{\text{П}_0} = 548 \text{ К}$, $\Delta T_{\text{П}} \cdot \alpha = 75 \text{ К}$; $T_{\text{В}_0} = 818 \text{ К}$, $\Delta T_{\text{В}} \cdot \alpha = 60 \text{ К}$; $T_{\text{С}_0} = 908 \text{ К}$, $\Delta T_{\text{С}} \cdot \alpha = 75 \text{ К}$, де T_0 – нульовий рівень варіювання факторів, α – величина зіркового плеча. Обчислення проводились за допомогою IBM PS комп'ютера згідно методики [2,3]. Перевірку адекватності гіпотетичної моделі і залежностей коефіцієнтів регресії здійснювали за критеріями Фішера і Стьюдента при 5% рівні значущості [3].

3. Коефіцієнти одержаних рівнянь регресії, залежності параметрів оптимізації від технологічних факторів у кодованому і явному виглядах, а також оптимальні значення параметрів і факторів наведено в табл.1-4. Графічне зображення гіперповерхонь відгуку параметрів оптимізації представлено на рис.1-3.

Аналізуючи рівняння регресії (табл.2 і 3) для параметрів оптимізації, можна

стверджувати, що для всіх параметрів фоторезисторів має місце ефект міжфакторної взаємодії, оскільки в одержаних моделях деякі або всі коефіцієнти регресії $|b_{ij}| < \Delta b_j$ (табл.1).

Розглядаючи вплив технологічних факторів ($T_{\text{П}}$, $T_{\text{В}}$ і $T_{\text{С}}$) вирощування епітаксійних шарів n-PbTe на параметри $U_{\text{ш}}$, D_{λ}^* і R_V фоторезисторів, виготовлених

на основі цього матеріалу, ми прийшли до висновку, що для всіх параметрів початкове підвищення температури стінок камери в інтервалі 863 ... 953 К є причиною збільшення значення параметрів оптимізації при зростанні $T_{\text{В}}$ ($T_{\text{В}} = 783 \dots 853 \text{ К}$), коли $T_{\text{П}} = 548 \text{ К}$, хоча при високих $T_{\text{С}}$ за тих же умов спостерігається зменшення $U_{\text{ш}}$ і зростання D_{λ}^* і R_V (рис.1-3,а).

При $T_{\text{В}} = 818 \text{ К}$ підвищення $T_{\text{П}}$ на зміну $U_{\text{ш}}$, D_{λ}^* і R_V впливає по-різному, а зростання $T_{\text{С}}$ при фіксованих $T_{\text{П}}$ є причиною збільшення значень досліджуваних параметрів (рис.1-3,б). Розглядаючи вплив $T_{\text{П}}$ і $T_{\text{С}}$ на характер зміни напруги шумів фоторезисторів при $T_{\text{В}} = 818 \text{ К}$, можна стверджувати, що підвищення $T_{\text{П}}$ до 540 К при фіксованому значенні $T_{\text{С}}$ веде до зменшення значень параметру оптимізації, які зростають при $T_{\text{П}} > 540 \text{ К}$. Збільшення $T_{\text{П}}$, коли $T_{\text{В}} = 818 \text{ К}$, є причиною зростання виявної здатності фоторезисторів, але з підвищенням $T_{\text{С}}$ крутизна наростання параметру оптимізації стає меншою. Зростання $T_{\text{П}}$ при $T_{\text{С}} < 920 \text{ К}$ веде до збільшення, а при $T_{\text{С}} > 920 \text{ К}$ – до зменшення значення D_{λ}^* . Але при зростанні $T_{\text{П}}$ і $T_{\text{С}} > 920 \text{ К}$ різко зростає напруга шумів. При $T_{\text{В}} = 818 \text{ К}$ характер впливу технологічних факторів $T_{\text{П}}$ і $T_{\text{С}}$ на зміну вольт-ватної чутливості такий самий, як і на зміну напруги шумів фоторезисторів.

Коли $T_{\text{С}} = 908 \text{ К}$, підвищення $T_{\text{В}}$ веде до різкого зростання значень всіх параметрів оптимізації (рис.1-3,в). При зростанні $T_{\text{П}}$ і фіксованому значенні $T_{\text{В}}$ виявна здатність зменшується, але вплив $T_{\text{П}}$ в міру її зростання на зміну виявної здатності фоторезисторів є незначним (рис.1,в). Зі збільшенням $T_{\text{В}}$ при $T_{\text{П}} < 540 \text{ К}$ спостерігається напруги шумів

Таблиця 1

Коефіцієнти рівнянь регресії гіперповерхонь відгуку параметрів фоторезисторів, виготовлених на основі епітаксійних шарів n-PbTe

Параметр оптимізації Y	Коефіцієнти регресії										Інтервал довіри Δb _i	Значення критерія Фішера	
	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₁₂	b ₁₃	b ₂₃	b ₁₁	b ₂₂	b ₃₃		F _{роз.}	F _{кр.}
Напруга шумів U _ш '	1.136	0.154	0.152	0.187	-0.131	0.056	-0.241	0.264	0.065	0.036	0.031	2.339	5.1
Вольт-ватна чутливість R _v '	0.424	0.102	0.144	0.194	-0.061	-0.042	-0.159	0.128	0.062	0.003	0.044	5.061	5.1
Виявна здатність D _λ *	1.852	0.108	0.384	0.502	-0.055	0.264	-0.306	0.063	0.066	0.109	0.147	2.475	5.1

Таблиця 2

Рівняння регресії, що описують залежність параметрів фоторезисторів, виготовлених на основі епітаксійних шарів n-PbTe від технологічних факторів їх вирощування у кодованому вигляді

Параметр оптимізації Y	Рівняння регресії	Кодовані значення факторів
Напруга шумів U _ш '	1.136 + 0.154 · x ₁ + 0.152 · x ₂ + 0.187 · x ₃ - 0.131 · x ₁ · x ₂ + 0.056 · x ₁ · x ₃ + 0.241 · x ₂ · x ₃ + 0.264 · x ₁ ² + 0.065 · x ₂ ² + 0.036 · x ₃ ²	x ₁ = $\frac{(T_{II} - 548) K}{45 K}$
Вольт-ватна чутливість R _v '	0.424 + 0.102 · x ₁ + 0.144 · x ₂ + 0.194 · x ₃ - 0.061 · x ₁ · x ₂ - 0.159 · x ₂ · x ₃ + 0.128 · x ₁ ² + 0.062 · x ₂ ²	x ₂ = $\frac{(T_B - 818) K}{35 K}$
Виявна здатність D _λ *	1.852 + 0.384 · x ₂ + 0.5 · x ₃ - 0.264 · x ₁ · x ₃ - 0.306 · x ₂ · x ₃	x ₃ = $\frac{(T_C - 908) K}{45 K}$

де Y=b₀+b₁·x₁+b₂·x₂+b₃·x₃+b₁₂·x₁·x₂+b₁₃·x₁·x₃+b₂₃·x₂·x₃+b₁₁·x₁²+b₂₂·x₂²+b₃₃·x₃²

Таблиця 3

Рівняння регресії, що описують залежність параметрів фоторезисторів, виготовлених на основі епітаксійних шарів n-PbTe, від технологічних факторів їх вирощування у явному вигляді

Параметр оптимізації	Рівняння регресії
U _ш , В	-5.593 · 10 ⁻⁹ - 9.654 · 10 ⁻¹² T _{II} + 1.021 · 10 ⁻¹¹ T _B + 8.188 · 10 ⁻¹² T _C - 8.317 · 10 ⁻¹⁵ T _{II} T _B + 2.765 · 10 ⁻¹⁵ T _{II} T _C - 1.530 · 10 ⁻¹⁴ T _B T _C + 1.304 · 10 ⁻¹⁴ T _{II} ² + 5.306 · 10 ⁻¹⁵ T _B ² + 1.778 · 10 ⁻¹⁵ T _C ²
R _v , В/Вт	-4.759 · 10 ³ - 3.533 · 10 ⁰ T _{II} + 3.420 · 10 ⁰ T _B + 8.689 · 10 ⁰ T _C - 3.873 · 10 ⁻³ T _{II} T _B - 1.010 · 10 ⁻² T _B T _C + 6.321 · 10 ⁻³ T _{II} ² + 5.061 · 10 ⁻³ T _B ²
D _λ [*] , смГц ^{1/2} ·Вт ⁻¹	-2.264 · 10 ¹¹ + 1.184 · 10 ⁸ T _{II} + 1.874 · 10 ⁸ T _B + 2.415 · 10 ⁸ T _C - 1.304 · 10 ⁵ T _{II} T _C - 1.943 · 10 ⁵ T _B T _C

фоторезисторів, а при T_{II}>540 К – її зростання (рис.2,в). Зміна T_{II} аналогічно впливає на зміну вольт-ватної чутливості фоторезисторів при високих значеннях

температури випарника (рис.3,в).

З аналізу графічної ілюстрації одержаних рівнянь регресії, що описують залежність

Таблиця 4

Оптимальні значення фотоелектричних параметрів резисторів, виготовлених на основі епітаксійних шарів n-PbTe, і технологічних факторів вирощування даного матеріалу з парової фази методом гарячої стінки

Параметр Оптимізації	Передбачені значення технологічних факторів			Значення параметра оптимізації	
	T_{II}, K	T_{B}, K	T_{C}, K	експериментальне $Y_{експ.}^*$	розраховане за формулою $Y_{розр.}$
Напруга шумів $U_{ш}, 10^{-10}B$	529	783	853	1.39	0.66
Вольт-ватна чутливість $R_V, 10^2 B/BT$	953	783	953	1.21	0.99
Виявна здатність $D_{\lambda}^*, 10^9 \text{ см}\cdot\Gamma\text{ц}^{1/2}\cdot\text{Вт}^{-1}$	503	853	953	1.72	2.66

* - середнє значення з п'ятих експериментів

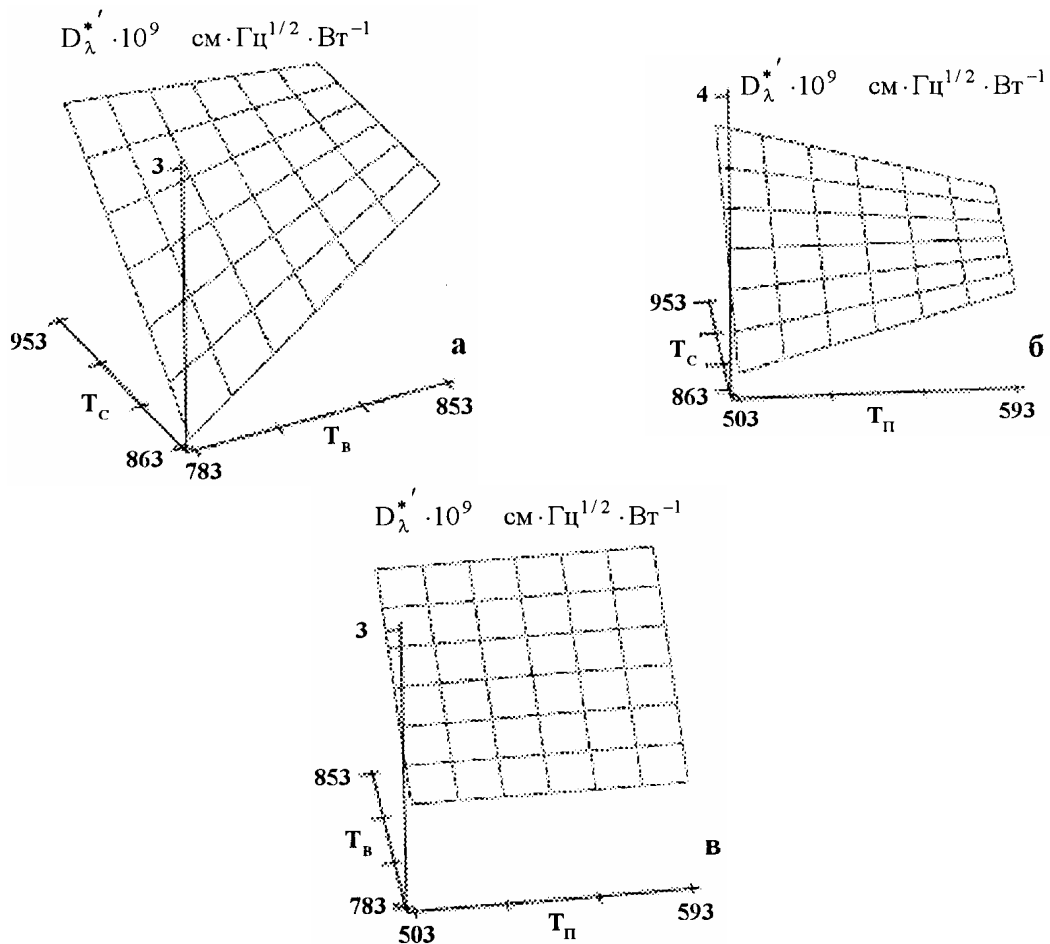


Рис. 1. Гіперповерхні відгуку для виявної здатності фоторезисторів, виготовлених на основі PbTe/(111)BaF2 при: а – $T_{II}=548 K$; б – $T_{B}=818 K$; в – $T_{C}=908 K$

параметрів $U_{ш}, D_{\lambda}^*$ і R_V , нами зроблено такі висновки:

- 1) зі зміною технологічних факторів вирощування епітаксійних шарів n-

PbTe не завжди при збільшенні значень параметру R_V фоторезисторів, виготовлених на основі даних матеріалів,

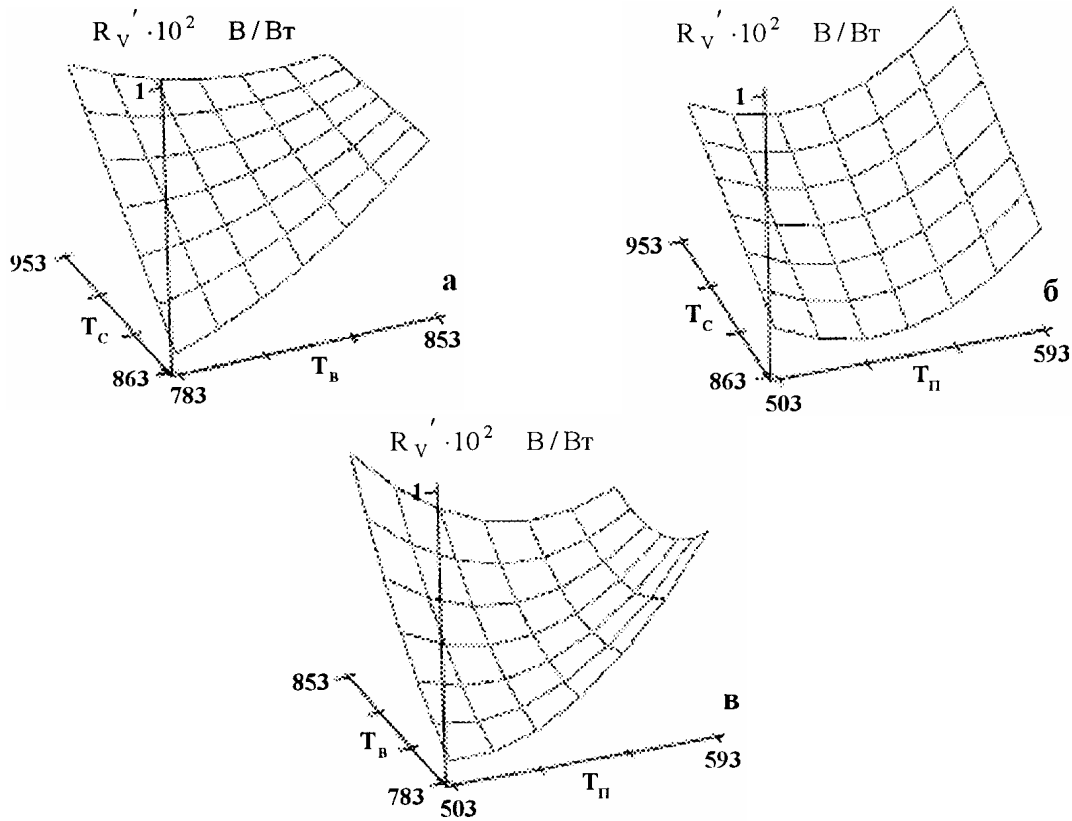


Рис. 2. Гіперповерхні відгуку для вольт-ватної чутливості фоторезисторів, виготовлених на основі PbTe/(111)BaF2 при: а – $T_{\text{П}}=548$ К; б – $T_{\text{В}}=818$ К; в – $T_{\text{С}}=908$ К

спостерігається зростання параметру D_{λ}^* ;

- 2) не при всіх значеннях технологічних факторів з області їх визначення при збільшенні значень параметру $U_{\text{Ш}}$ величина D_{λ}^* зменшується.

Ці твердження на нашу думку можна пояснити такими міркуваннями:

по-перше, в шум фоторезистора основний внесок роблять флуктуації середньої концентрації носіїв струму [4], яка в свою чергу визначається технологічними факторами $T_{\text{П}}$, $T_{\text{В}}$ і $T_{\text{С}}$ вирощування епітаксійних шарів n-PbTe;

по-друге, деяку невідповідність у зміні параметрів $U_{\text{Ш}}$ і D_{λ}^* можна пов'язати з ефектом екстракції носіїв заряду [5];

по-третє, можна стверджувати, що вплив технологічного фактору $T_{\text{П}}$ вирощування тонкошарового матеріалу n-PbTe на параметри фоторезисторів, виготовлених на його основі, є переважаючим у порівнянні з впливом $T_{\text{В}}$ і $T_{\text{С}}$. Домінуючий вплив $T_{\text{П}}$ на параметри оптимізації фоторезисторів

можна пов'язати з наступним [6,7]: при низьких температурах підкладок ($T_{\text{П}} \approx 503$ К) правильний ріст кристалічної ґратки конденсату ускладнюється через незначну рухливість молекул PbTe, що осаджуються. При підвищенні $T_{\text{П}}$ умови росту шарів наближаються до термодинамічно рівноважних, внаслідок чого значно покращується їх кристалічна структура, а отже, покращуються й електричні параметри даних шарів. При подальшому зростанні $T_{\text{П}}$ збільшується вплив пластичної деформації, яка обумовлена відмінністю за даних умов коефіцієнтів термічного розширення підкладки і тонкого шару, що призводить до погіршення структури епітаксійних шарів n-PbTe.

Слід зауважити, що крім сказаного вище, деяку невідповідність у залежності між величинами $U_{\text{Ш}}$, D_{λ}^* і $R_{\text{В}}$ можна пояснити також і тим, що значення критерія Фішера, за яким визначалась адекватність застосованої моделі, для кожного з параметрів є певним за величиною і розкид цих розрахованих значень є досить великим

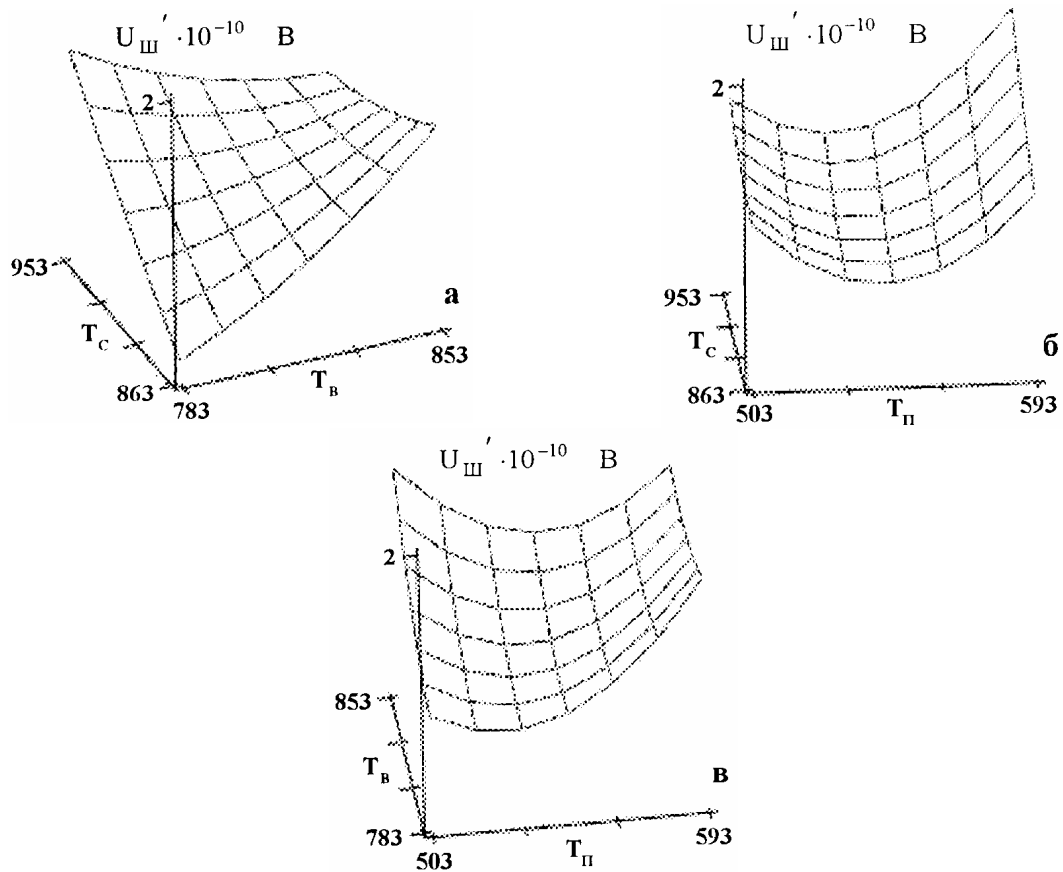


Рис. 3. Гіперповерхні відгуку для напруги шумів фоторезисторів, виготовлених на основі PbTe/(111)BaF2 при: а – $T_{\Pi}=548$ К; б – $T_B=818$ К; в – $T_C=908$ К

($F_{\text{розр.}}=2.34$ – для напруги шумів і 5.06 – для вольт-ватної чутливості фоторезисторів (табл.1)). Але оскільки для всіх параметрів оптимізації (табл.1) значення $F_{\text{розр.}}$ не перевищували значення $F_{\text{кр.}}$, то запропонована модель для всіх параметрів виявилась адекватною. Крім того, в рівнянні регресії, що описує залежність вольт-ватної чутливості від технологічних факторів, відсутній коефіцієнт b_{13} , а для виявної здатності – коефіцієнт b_{12} . Отже, обидва рівняння не досить повно враховують

взаємодію між технологічними факторами.

На основі викладеного вище можна стверджувати, що оптимальне значення T_{Π} параметру $U_{\text{ш}}$ фоторезисторів (табл.4) знаходиться в інтервалі температур, коли використані епітаксійні шари володіють порівняно високими структурними й електричними параметрами. Оптимальні значення параметрів D_{λ}^* і R_V знайдено при значеннях технологічних факторів, які знаходяться на межі області планування.

- [1] И.М. Раренко, Д.М. Фрейк. *Полупроводниковые материалы и приборы инфракрасной техники*. Изд-во Черновицкого ун-та, Черновцы (1980).
- [2] Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. *Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий*. Наука, М. (1971).
- [3] Налимов В.В., Чернова Н.А.. *Статистические методы планирования эксперимента*. Наука, М. (1965).
- [4] *Фотоприемники видимого и ИК диапазонов*. Под ред. Р.Дж. Киеса. Радио и связь, М. (1985).
- [5] П.А. Богомолов, В.И. Сидоров, И.Ф. Усольцев. *Приемные устройства ИК-систем*. Радио и связь, М. (1987).
- [6] Д.М. Фрейк, М.А. Галушак, Л.И. Межиловская. *Физика и техника полупроводниковых пленок*. Выща школа, Львов (1988).

- [7] Фреик Д.М., Павлюк М.Ф., Чобанюк В.М., Перкатюк И.И.. Свойства эпитаксиальных слоев соединений $A^{IV}B^{VI}$ и их твердых растворов. // *Изв. АН СССР. Неорган. материалы.* **21(4)**, сс.573-577 (1985).

The dependence of the photoparameters of resistors on the bases of layed n-PbTe from its obtained of technological factors

A.M. Dobrovolska*, V.M. Chobaniuk**, I.M. Rarenko***

**Ivano-Frankivsk State Medical Academy, Galyska str., 2, Ivano-Frankivsc, 76000, Ukraine*

***Precarpathian University named by V.Stefanyk, 76025, Ivano-Frankivsc, Shevchenko str., 57*

****Chernivtsi State university named by Yu. Fedckovych, Chernivtsy, Ukraine*

The aim of this work is studying the influence of the technological factors of the growth of n-PbTe epitaxial layers obtained from vapour phase by hot wall method on the main photoelectric parameters of the resistors made on their base. The technological factors when investigated paremeters actieve the optimal values have been established.