ФІЗИКА І ХІМІЯ ТВЕРДОГО ТІЛА
Т. 3, № 2 (2002) С. 315-324

PHYSICS AND CHEMISTRY OF SOLID STATE
V. 3, № 2 (2002) P. 315-324

УДК 535.3, 535.5

Д.М. Фреїк[1], Л.Р. Павлюк[2], М.О. Галущак[2], В.М. Бойчук[1], А.М. Яцура[1]

Атомні дефекти і електричні властивості епітаксійних плівок $PbTe\langle Te\rangle$:In

[1]*Фізико-хімічний інститут при Прикарпатському університеті імені Василя Стефаника, вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ, 76000 Україна*
[2]*Івано-Франківський національний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 25, м. Івано-Франківськ, 76000 Україна*

Методами кристалоквазіхімії і квазіхімії проаналізовано механізми процесу легування індієм плівок PbTe, збагачених телуром. Встановлено, що однозарядні атоми індію In^{+}_{Pb} заміщуючи атоми свинцю у октаедричних порожнинах щільної упаковки телуру кристалічної структури PbTe, виступають донорами. Визначено константи рівноваги і ентальпії квазіхімічних реакцій утворення вакансій свинцю $[V^{2-}_{Pb}]$ і заміщення індієм свинцю $[In^{+}_{Pb}]$.

Ключові слова: дефекти, телурид свинцю, квазіхімічні реакції, кристалоквазіхімія.

Стаття поступила до редакції 10.12.2001; прийнята до друку 05.04.2002

I. Вступ

Телурид свинцю характеризується двосторонньою областю гомогенності [1]. Власні дефекти, пов'язані із відхиленнями від стехіометричного складу, обумовлюють високу концентрацію носіїв заряду, яка складає 10^{18}-10^{19} $см^{-3}$. При цьому вакансії є електрично активними: у підгратці свинцю – акцептори, а у підгратці телуру – донори [2, 3]. Легування телуриду свинцю домішками – ефективний спосіб впливу як на дефектну атомну підсистему кристала, так і енергетичний спектр носіїв заряду [4]. Зауважимо, що фізико-хімічна природа процесів легування елементами третьої групи виявилася достатньо складною. Так, зокрема, заміщуючи атоми IV групи (свинець) ці домішки, на перший погляд, повинні бути акцепторами. Насправді тільки талій дійсно є акцептором, а галій та індій – донори [4]. Крім того домішка індію у PbTe стабілізує (піннінг) рівень хімічного потенціалу [5]. Це пов'язано із існуванням частково заповнених квазілокальних (резонансних) домішкових станів, розміщених вище, при низьких температурах, від дна зони провідності. Так, при збільшенні вмісту індію енергія Фермі і концентрація вільних електронів зростають до тих пір, поки рівень Фермі не досягне енергії домішкових станів. Після цього подальший ріст концентрації електронів у зоні провідності зупиняється, а енергія Фермі стабілізується. Із підвищенням температури домішкові рівні опускаються у заборонену зону, зміщуючи за собою рівень Фермі і, відповідно, змінюється холлівська концентрація електронів.

Незважаючи на достатньо детальне вивчення енергетичного спектра домішки індію у PbTe, кристалохімічний аспект проблеми залишається не виясненим ще і тепер.

У даній роботі вплив індію на електричні параметри плівок PbTe, збагачених телуром, пояснено із позицій квазіхімічних і кристалоквазіхімічних підходів.

II. Методика експерименту та його результати

Тонкі плівки телуриду свинцю, леговані індієм, вирощували із парової фази методом гарячої стінки на сколах (111) кристалів BaF_2 [6]. Крім основного випарника із сполукою PbTe, використовували ще два додаткових випарники із чистими телуром (Te) і індієм (In). Вибрана технологія, згідно [7], забезпечувала незалежне варіювання у широких границях концентрації як власних дефектів, так і домішкових атомів у матеріалі осаджених плівок. Так, зокрема, температурою додаткового випарника із телуром T_{Te} = 600-700 К задавали початкову концентрацію дірок у межах $2\cdot10^{17} - 3\cdot10^{18}$ $см^{-3}$.

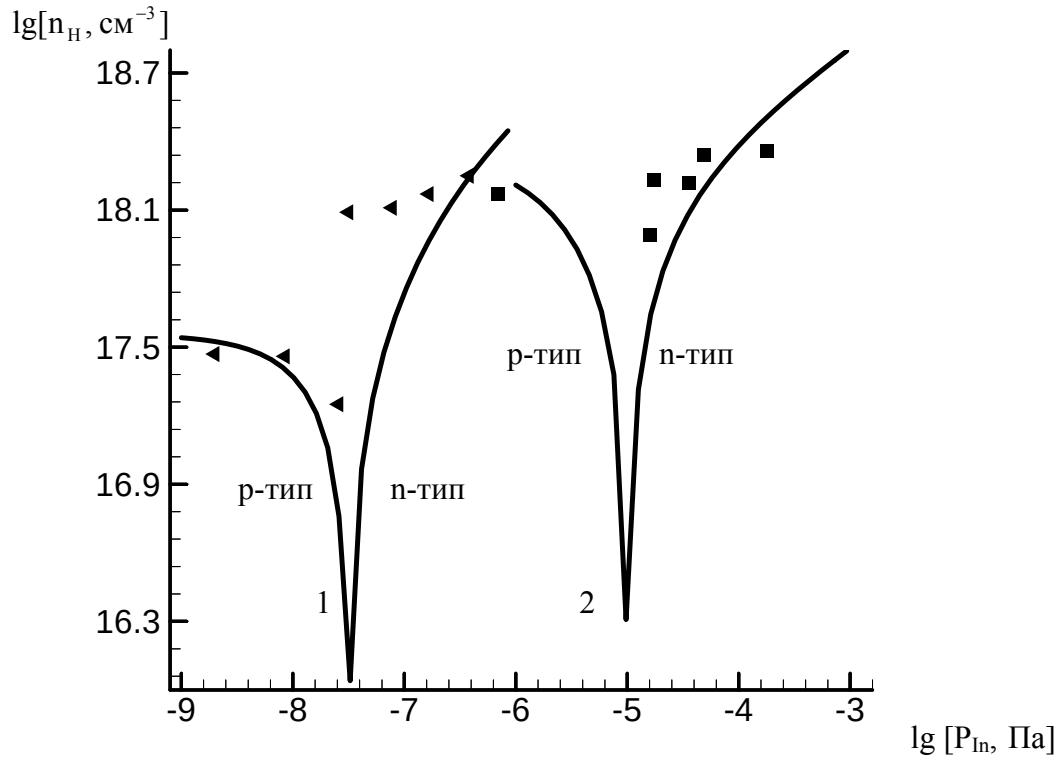


Рис. 1. Залежність холлівської концентрації носіїв струму (n_H) у плівках PbTe : In від тиску джерела індію P_{In}. для різних значень температури додаткового джерела телуру T_{Te}: 1 – 640, 2 – 680. ▲, ■ – експеримент [7]; суцільні лінії – розрахунок згідно (4.4).

Температура додаткового джерела індію, із-за значно нижчих значень парціального тиску $P_{In} = 10^{-8} – 10^{-4}$ Па, підтримувалася в інтервалі T_{In} = 1100-900 К. Температура основного випарника складала T_B = 920 К, а стінок – T_C = 950 К. Температура осадження (підкладки) $T_П$ = 620-700 К забезпечувала формування структурно досконалих плівок товщиною 2-5 мкм. Швидкість росту плівок була у межах 3-6 нмс$^{-1}$.

Одержані плівки досліджувалися методами двокристальної рентгенівської спектроскопії та оже-електронної спектроскопії. Електричні властивості плівок визначалися компенсаційним методом у постійних електричних і магнітних полях.

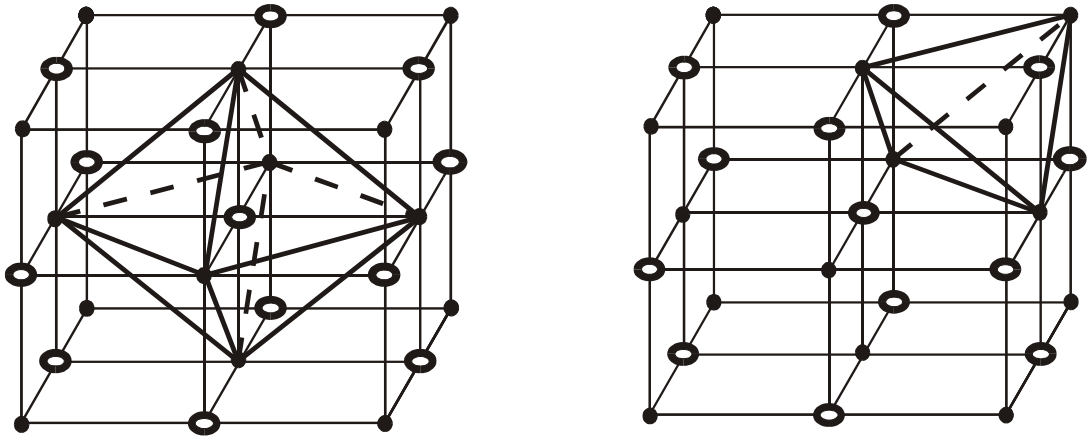
У результаті проведених досліджень встановлено, що плівки PbTe мають мозаїчну структуру із величиною блоків b=0,1-0,5 см, які орієнтовані площинами $\langle 111 \rangle \| \langle 111 \rangle$ BaF_2. Кути розорієнтації складають 15-30′. Значення електричних параметрів плівок суттєво залежать від умов осадження. Так, зокрема, за відсутності компенсуючих парів телуру та індію формуються плівки PbTe тільки електронного типу. При цьому підвищення $T_П$ обумовлює деяке зменшення концентрації електронів. Збагачення пари на телур у зоні осадження за допомогою додаткового джерела сприяє формуванню матеріалу p-типу. Концентрація дірок визначається в основному T_{Te}. Зміною температури додаткового джерела пари індію T_{In} можна керувати рівнем легування плівок і, таким чином, їх електричними параметрами. Донорний характер легуючої дії індію PbTe дає можливість не тільки зменшувати концентрацію дірок, але при певних значеннях P_{In} реалізувати p-n-перехід, і подальше зростання концентрації електронів (рис. 1). При цьому значення тиску пари індію, що відповідає n-p-переходу $P_{In,p-n}$ суттєво залежить від парціального тиску пари телуру в зоні осадження. А саме, із зростанням останнього (P_{Te_2}) $P_{In,p-n}$ збільшується (рис. 1). На основі аналізу експериментальних результатів авторами [7] знайдено аналітичний вираз для цієї залежності:

$$\lg(P_{In,p-n})(\text{Па}) = -7{,}1 + 3{,}8\lg(P_{Te_2})(\text{Па}). \quad (2.1)$$

III. Кристалоквазіхімія дефектів

Моделі, запропоновані у роботах [4, 5] для пояснення фізичних властивостей кристалів PbTe:In, не дають повної відповіді на питання про характер розміщення легуючої домішки у кристалічній гратці основної матриці. Про це, зокрема, можна дізнатися на основі кристалоквазіхімічних підходів [8].

Відомо [1], що телурид свинцю кристалізується у структурі NaCl із параметром гратки a = 6,452 Å.



а *б*

Рис. 2. Кристалічна структура телуриду свинцю з октаедричним (*а*) і тетраедричним (*б*) сусідством атомів телуру: ⬬ – Pb, ● – Te.

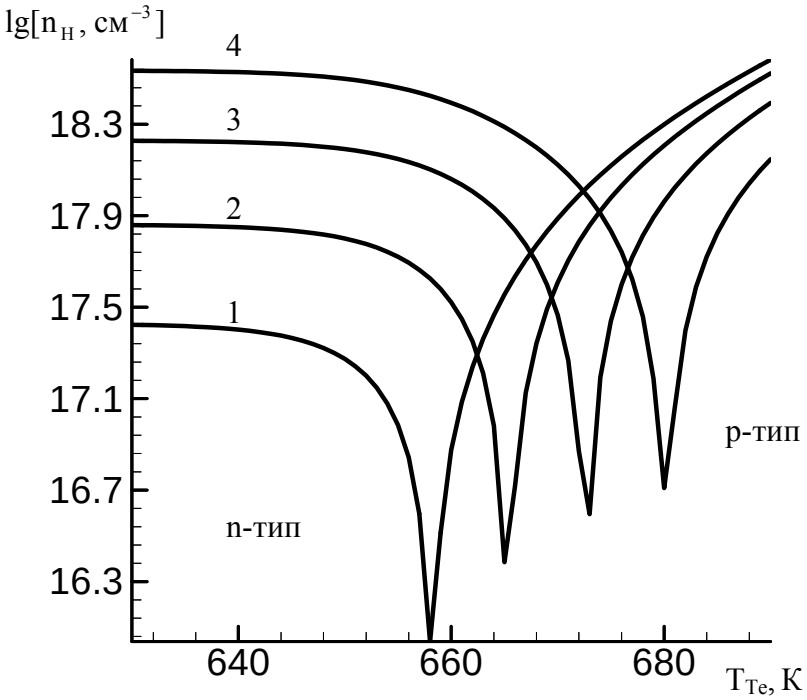


Рис. 3. Залежність холлівської концентрації носіїв струму (n_H) у плівках PbTe : In від температури джерела додаткового телуру T_{Te} для різних значень парціального тиску парів індію P_{In}, Па: 1 – $10^{-3.5}$; 2 – $10^{-4.0}$; 3 – $10^{-4.5}$; 4 – 10^{-4}. (розрахунок згідно (4.4), (4.5)).

Ця структура характеризується октаедричним (О) і тетраедричним (Т) оточенням атомів, а також октаедричними (ОП) і тетраедричними (ТП) порожнинами (рис. 2). ОП – це вакансії телуру у катіонній, чи свинцю в аніонній підгратках, а ТП – незайняті місця у тетраедричному оточенні Pb чи Te відповідно (рис. 2). Атоми свинцю і телуру мають конфігурацію валентних електронів $6s^2 6p^2(\mathrm{Pb})$, $5s^2 5p^4(\mathrm{Te})$, а відповідні їх радіуси чисельно рівні: $r_{O,PU} = 1{,}62$ Å, $r_{T,PU} = 1{,}46$ Å, $r_{O,Te} = 1{,}64$ Å, $r_{T,Te} = 1{,}34$ Å [9].

Кристалоквазіхімічний метод опису процесів дефектоутвореня полягає у накладанні кристалоквазіхімічного кластеру на антиструктуру основної матриці. Для телуриду свинцю антиструктурою є галеніт $V''_{Pb}V''_{Te}$. При надлишку телуру антиструктура стехіометричного PbTe утворює кластер із аніонними вакансіями V''_{Pb}:

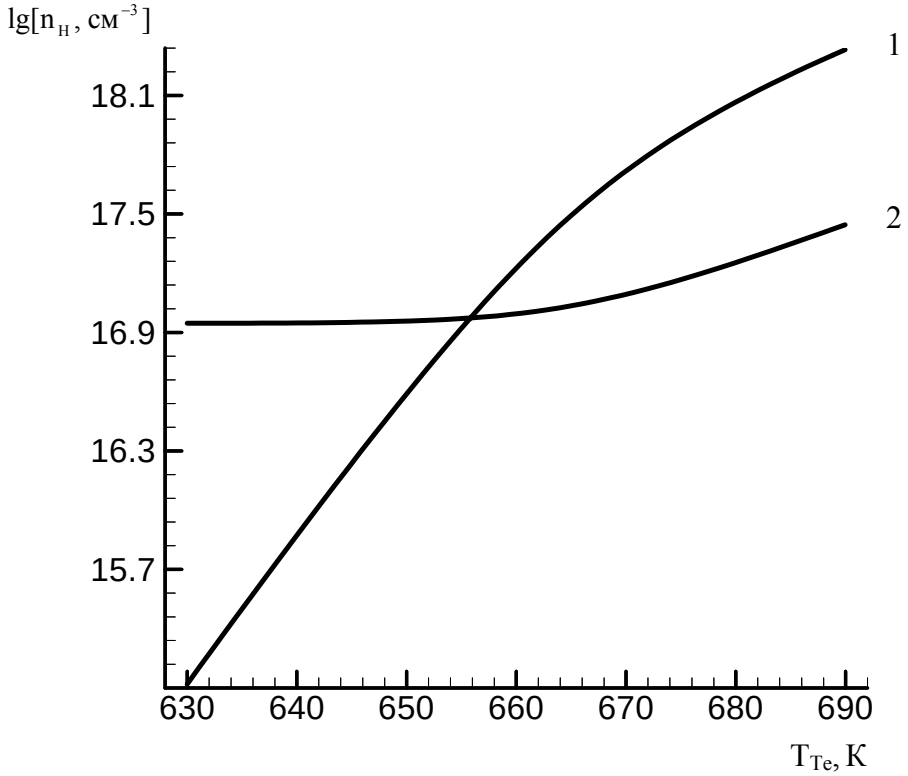


Рис. 4. Залежність концентрації дефектів ($[V_{Pb}^{2-}]$ – 1, $[In_{Pb}^{+}]$ – 2) у плівках PbTe : In від температури джерела додаткового телуру T_{Te}. ($T_П$ = 623 К, $P_{In} = 10^{-5,5}$ Па) (розрахунок згідно (4.2) і (4.3)).

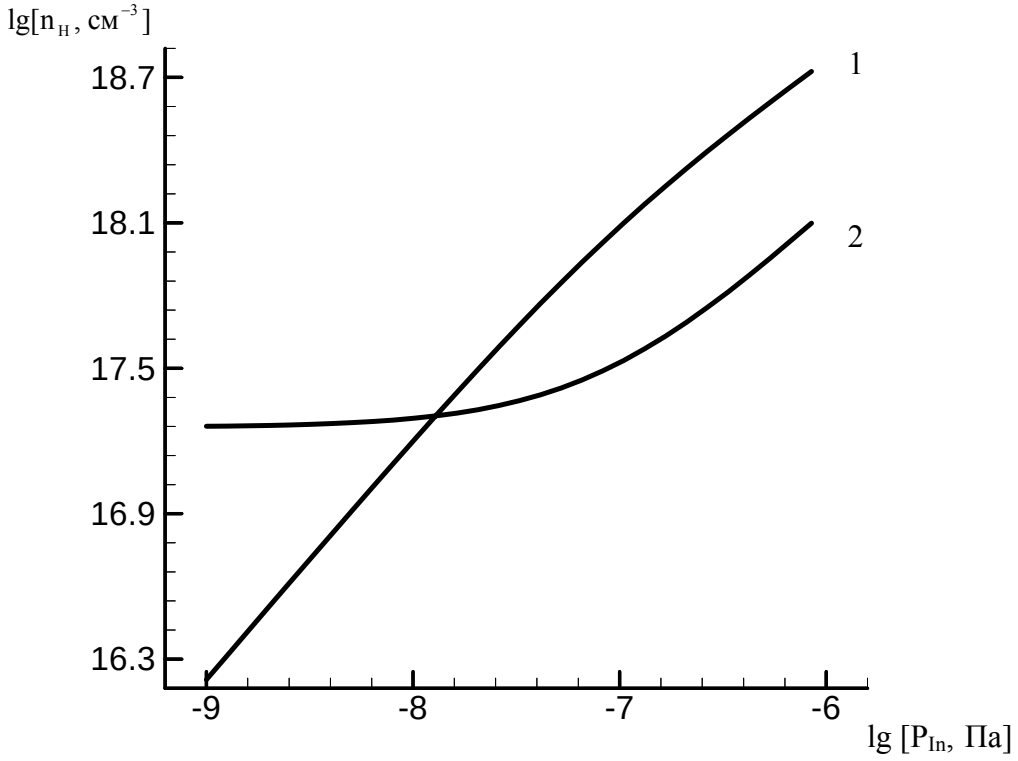


Рис. 5. Залежність концентрації дефектів ($[In_{Pb}^{+}]$ – 1, $[V_{Pb}^{2-}]$ – 2) у плівках PbTe : In від тиску джерела індію P_{In}. ($T_П$ = 623 К, T_{Te} = 640 К) (розрахунок згідно (4.2) і (4.3)).

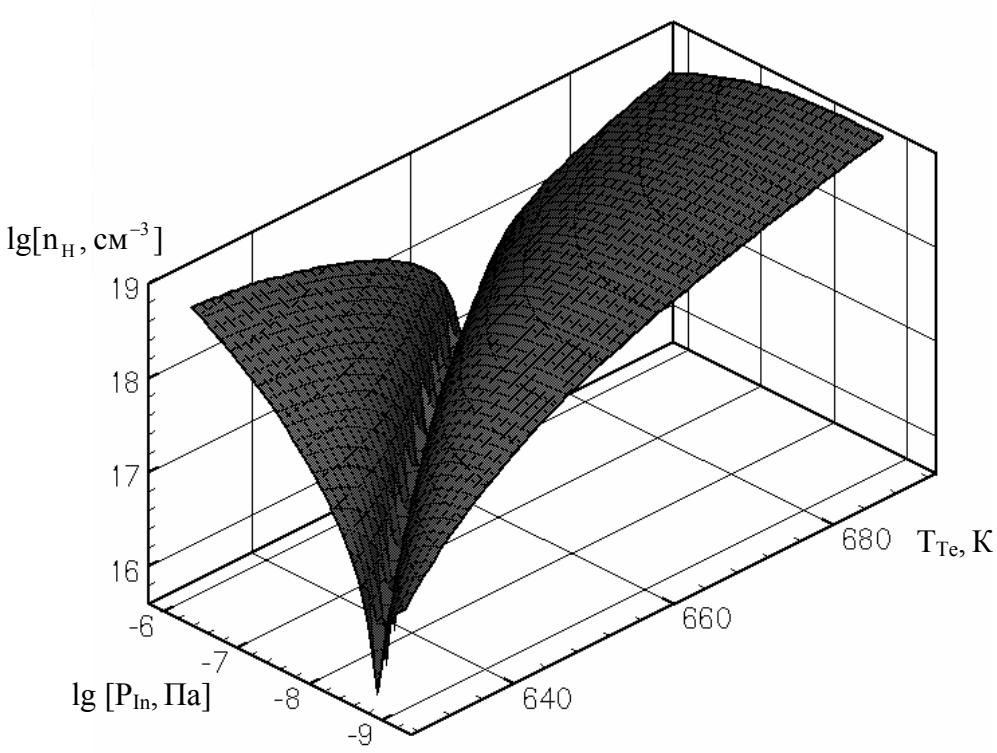


Рис. 6. Просторова залежність холлівської концентрації носіїв струму (n_H) у плівках $PbTe:In$ від технологічних факторів T_{Te} і P_{In} у методі гарячої стінки ($T_П = 623$ К) (розрахунок згідно (4.4) і (4.5)).

$$V''_{Pb}V^{\cdot\cdot}_{Te} + Te^{o} \leftrightarrow V^{x}_{Pb}Te^{x}_{Te}. \qquad (3.1)$$

Тут "′" – негативний заряд, "·" – позитивний заряд, "^{x}", "^{o}" – нульові заряди, $V''_{Pb}, V^{\cdot\cdot}_{Te}$ – заряджені вакансії свинцю і телуру відповідно, Te_{Te} – телур на місці атомів телуру кристалічної гратки, Te^0 – нейтральні атоми телуру. Суперпозиція отриманого кластера (3.1) із квазіхімічною формулою основної матриці $Pb^{x}_{Pb}Te^{x}_{Te}$ описується рівнянням:

$$(1-\alpha)Pb^{x}_{Pb}Te^{x}_{Te} + \alpha\left(V^{x}_{Pb}Te^{x}_{Te}\right) \leftrightarrow \left(Pb^{x}_{1-\alpha}V''_{\alpha}\right)_{Pb}Te^{x}_{Te} + 2\alpha h^{\cdot}. \qquad (3.2)$$

де α – відхилення від стехіометрії, $h^{\cdot}$ – концентрація дірок.

Із співвідношення (3.2) видно, що діркова провідність p-PbTe пов'язана із негативно зарядженими вакансіями у катіонній підгратці $(V''_{\alpha\,Pb})$. У нашому представленні вакансії свинцю V''_{Pb}, найбільш імовірно, є не що інше як октаедричні порожнини у вільному оточенні атомів телуру (рис. 2).

Легування телуриду свинцю індієм, з врахуванням його донорної дії і однозарядності [7], може відбуватися різними механізмами: заміщення атомами індію вакансій свинцю, тобто октаедричних порожнин оточення атомів телуру ($In^0 \rightarrow ОП$, механізм А) та вкорінення індію у міжвузля, тобто у тетраедричні порожнини ($In^0 \rightarrow ТП$, механізм В).

3.1. Механізм А (заміщення).

Суперпозиція індію із антиструктурою основної матриці утворює кластер:

$$V''_{Pb}V^{\cdot\cdot}_{Te} + In^{o} \leftrightarrow In'_{Pb}V^{\cdot}_{Te}, \qquad (3.3)$$

Тоді:

$$\begin{aligned}&(1-x)[(Pb^{x}_{1-\alpha}V''_{\alpha})_{Pb}Te^{x}_{Te} + 2\alpha h^{\cdot}] + x(In'_{Pb}V^{\cdot}_{Te}) \leftrightarrow \\ &\leftrightarrow [Pb^{x}_{(1-\alpha)(1-x)}In'_{x}V''_{\alpha(1-x)}]_{Pb}[Te^{x}_{(1-x)}V^{\cdot}_{x}]_{Te} + 2\alpha(1-x)h^{\cdot} \leftrightarrow \\ &\leftrightarrow [Pb^{x}_{(1-\alpha)(1-x)}In^{x}_{x}V''_{\alpha(1-x)}]_{Pb}[Te^{x}_{(1-x)}V^{\cdot\cdot}_{x}]_{Te} + 2\alpha(1-x)h^{\cdot} + 2xe'.\end{aligned} \qquad (3.4)$$

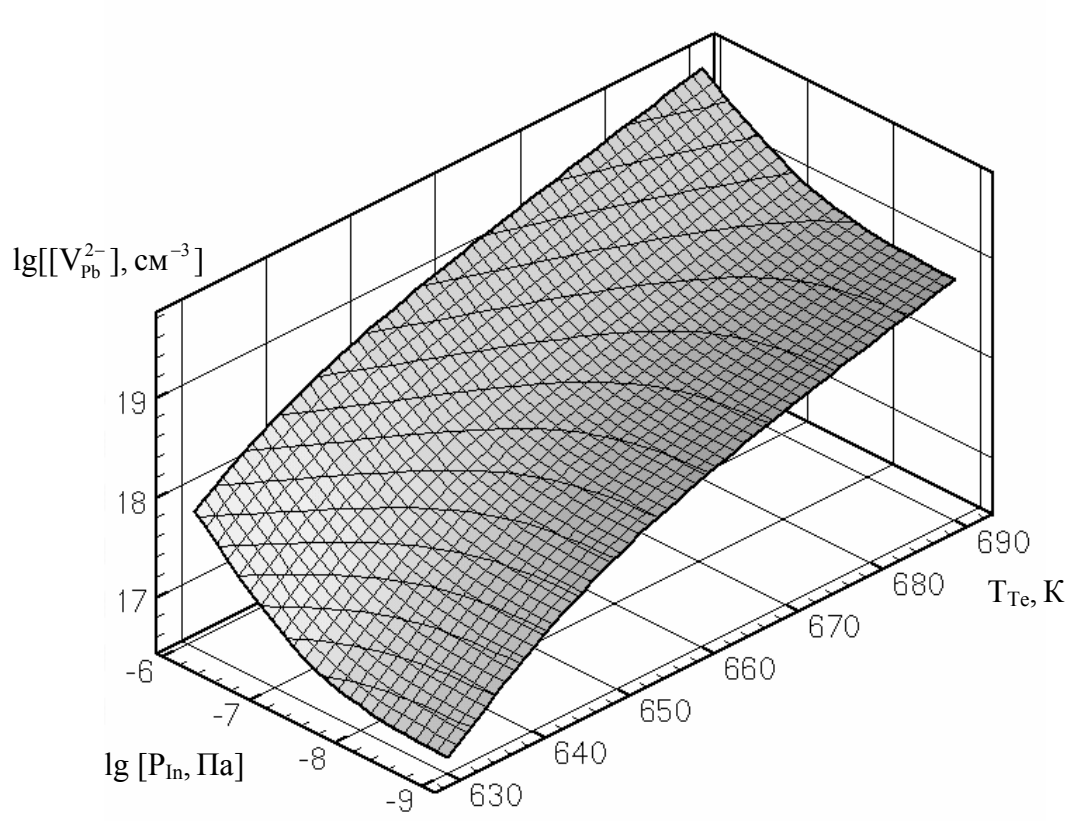


Рис. 7. Просторова залежність концентрації вакансій свинцю ($[V_{Pb}^{2-}]$) у плівках PbTe : In від технологічних факторів T_{Te} і P_{In} у методі гарячої стінки ($T_П$ = 623 K) (розрахунок згідно (4.2)).

У цьому випадку (механізм А) має місце пряме заміщення індієм свинцю в октаедричних порожнинах щільної упаковки атомів телуру ($In \xrightarrow{ОП} Pb$), яке обумовлює зменшення катіонних вакансій $V''_{\alpha(1-x)} \to V''_{\alpha}$; $\alpha(1-x) < \alpha$, так як $x < 1$ і, як наслідок, зменшення концентрації дірок ($2\alpha(1-x)h^{\cdot} \to 2\alpha h^{\cdot}$; $2\alpha(1-x) < 2\alpha$, бо $x < 1$) та появу вільних електронів ($2xe'$).

3.2. Механізм В (вкорінення).
За аналогією до попереднього, будемо мати:

$$V''_{Pb}V^{\cdot\cdot}_{Te} + In^{o} \leftrightarrow V''_{Pb}V^{\cdot}_{Te}(In^{\cdot})_i, \qquad (3.5)$$

$$\begin{aligned}(1-x)[(Pb^{x}_{1-\alpha}V''_{\alpha})_{Pb}Te^{x}_{Te} + 2\alpha h^{\cdot}] + x[V''_{Pb}V^{\cdot\cdot}_{Te}(In^{\cdot})_i] \leftrightarrow \\ \leftrightarrow [Pb^{x}_{(1-\alpha)(1-x)}V''_{\alpha(1-x)+x}]_{Pb}[Te^{x}_{(1-x)}V^{\cdot\cdot}_{x}]_{Te}(In^{\cdot})_i + 2\alpha(1-x)h^{\cdot} + xe'.\end{aligned} \qquad (3.6)$$

Тут, за рахунок перерозподілу дефектів у катіонній підгратці і зростання вакансій у аніонній, має також місце зменшення концентрації дірок і поява електронів.

Таким чином, як механізм заміщення (3.4), так і механізм вкорінення (3.6) легуючої домішки атомів індію у кристалічну гратку основної матриці телуриду свинцю обумовлюють донорну дію. Але, враховуючи чисто геометричні, розмірні характеристики ($r_{O,In}$ = 1,27 Å [9]), а також більш ефективну донорну дію індію при механізмі А ($In^{0} \xrightarrow{ОП} Pb$), можна стверджувати про те, що заміщення індієм октаедричних порожнин щільної упаковки атомів телуру кристалічної гратки PbTe (вакансії свинцю) є найбільш імовірним.

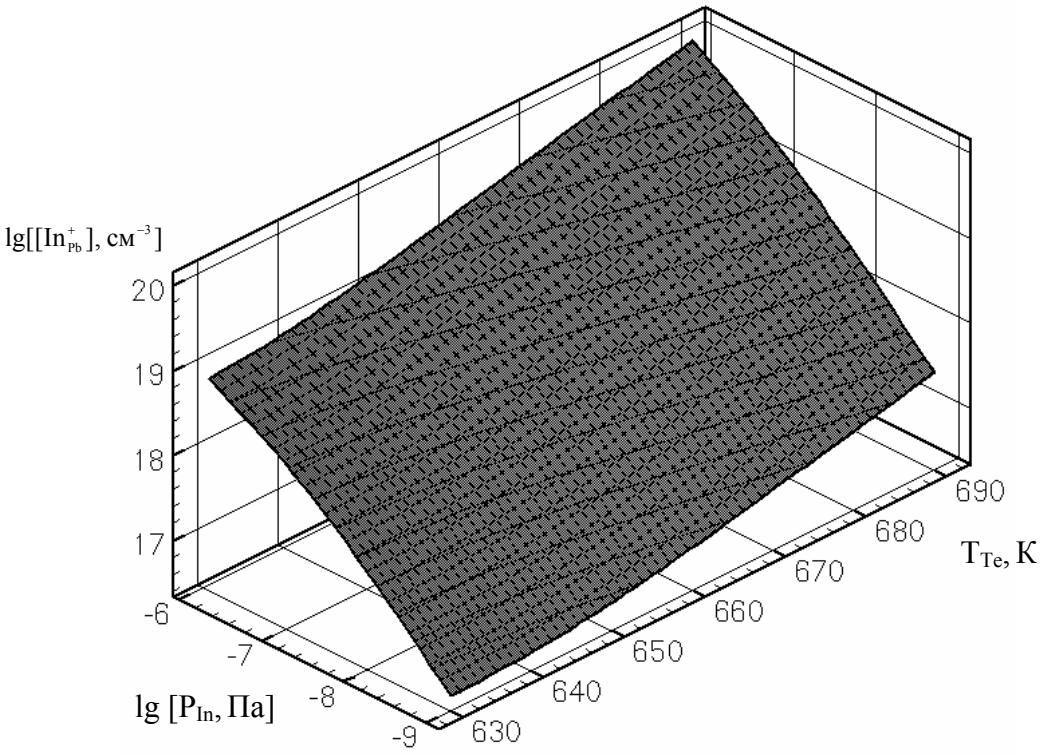


Рис. 8. Просторова залежність концентрації легуючої домішки індію ($[In^{+}_{Pb}]$) у плівках $PbTe:In$ від технологічних факторів T_{Te} і P_{In} у методі гарячої стінки ($T_П = 623$ К) (розрахунок згідно (4.3)).

IV. Квазіхімічні рівняння утворення дефектів

Рівноважний стан дефектної підсистеми у плівках PbTe, збагачених телуром і легованих індієм можна описати такими квазіхімічними співвідношеннями:

$$\frac{1}{2}Te_2^V \Leftrightarrow Te_{Te} + V_{Pb}^{2-} + 2h^+,$$

$$In^V \Leftrightarrow In_{Pb}^+ + e^-,$$

$$"0" \Leftrightarrow e^- + h^+,$$

$$K_{V,Pb} = [V_{Pb}^{2-}] \cdot p^2 / [P_{Te_2}^{1/2}]; \quad \text{(I)}$$

$$K_{In} = [In_{Pb}^+] \cdot n / [P_{In}]; \quad \text{(II)}$$

$$K_i = n \cdot p. \quad \text{(III)}$$

Тут реакція (I) описує перехід надлишкового телуру з пари Te_2^V у аніонну підгратку Te_{Te}. При цьому утворюються негативні двозарядні вакансії свинцю (V_{Pb}^{2-}) і дірки. Реакція (II) описує перехід індію з пари In^V у кристалічну гратку PbTe із утворенням однозарядних донорів (In_{Pb}^+) і електронів e^-. Реакція (III) описує власну провідність. Тут $K_{V,Pb}$ K_{In}, K_i – константи рівноваги відповідних квазіхімічних рівнянь I, II, III.

Згідно [2]

$$K_j = K_j^0 \exp(-\Delta H_j / kT), \quad (4.1)$$

де K_j^0 – стала величина, ΔH_j – ентальпія, k – стала Больцмана, T – температура. Рівняння електронейтральності, за умов запропонованої дефектної підсистеми, буде мати вигляд:

$$n + 2 \cdot [V_{Pb}^{2-}] = p + [In_{Pb}^+]. \quad \text{(IV)}$$

На основі рівнянь (I)-(III) одержимо для концентрацій вакансій свинцю і легуючого індію:

$$[V_{Pb}^{2-}] = n^2 \cdot K_{V,Pb} P_{Te_2}^{1/2} / K_i^2, \quad (4.1)$$

$$[In_{Pb}^+] = K_{In} \cdot P_{In} / n. \quad (4.3)$$

Зауважимо, що рівноважні концентрації $[V_{Pb}^{2-}]$ і $[In_{Pb}^+]$ визначають при температурі осадження

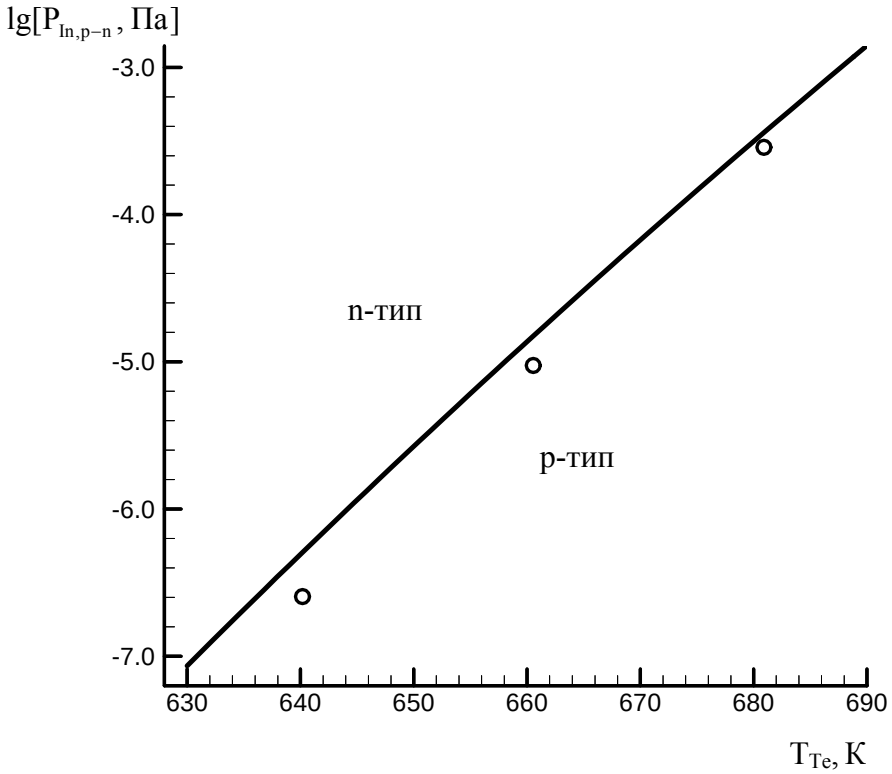


Рис. 9. Залежність тиску термодинамічного n-p-переходу ($P_{In,p-n}$) у плівках PbTe : In від температури джерела додаткового телуру T_{Te} у методі гарячої стінки:
○ – експеримент [7], суцільна лінія – розрахунок згідно (4.6).

$T_П$, а значення парціальних тисків телуру P_{Te_2} і індію

P_{In} – температурами додаткових випарників T_{Te} і T_{In} відповідно.

Враховуючи одержані співвідношення (4.2) і (4.3), рівняння електронейтральності (IV) набуде вигляду:

$$n + 2 \cdot n^2 \cdot K_{V,Pb} P_{Te_2}^{1/2} / K_i^2 = K_i / n + K_{In} \cdot P_{In} / n . \qquad (4.4)$$

Отриманий вираз (4.4) є рівнянням третього степеня відносно n і визначає залежність концентрації електронів від концентрації надлишкового телуру та індію. Маючи на увазі, що холлівська концентрація носіїв струму пов'язана із концентраціями електронів і дірок співвідношенням

$n_H = n - p$, $p = K_i / n$, остаточно будемо мати, що

$$n_H = n(1 - K_i n^{-2}) . \qquad (4.5)$$

Умова n-p-переходу ($n = p$) за заданих умов дефектоутворення буде відповідати значенню тиску індію:

$$P_{In,(p-n)} = P_{Te_2}^{1/2} \frac{2 \cdot K_{V,Pb}}{K_{In} \cdot K_i^{1/2}} . \qquad (4.6)$$

V. Аналіз результатів дослідження

Результати кристалоквазіхімічного та квазіхімічного аналізу дають можливість виконати розрахунок залежності як холлівської концентрації носіїв струму (4.4), (4.5) так і концентрації дефектів $[V_{Pb}^{2-}]$ (4.2), $[In_{Pb}^{+}]$ (4.3) плівок PbTe:In від технологічних факторів вирощування у методі гарячої стінки. На рис. 3-8 представлено деякі із них. Константи рівноваги квазіхімічних реакцій утворення вакансій свинцю $K_{V,Pb}$ і заміщення індієм свинцю K_{In}, одержані методом найменших квадратів на основі апроксимації експериментальних даних (рис. 1, 9) теоретичними залежностями (4.4), (4.5), (2.1) і (4.6) відповідно. Для інтервалів зміни тиску пари індію у зоні

осадження $P_{In} = 10^{-9} - 10^{-3}$ Па, температури додаткового джерела телуру $T_{Te} = 640\text{-}680$ К і температури підкладки $T_П = 623$ К отримано наступні значення констант рівноваги:

K_{In}: $K_{In} = 1{,}3 \cdot 10^{42}$ см$^{-3}$Па$^{-1/2}$ ($K^0_{In} = 9{,}0 \cdot 10^{42}$ см$^{-3}$Па$^{-1/2}$, $\Delta H = 0{,}1$ еВ);

$K_{V,Pb}$: $K_{V,Pb} = 4{,}0 \cdot 10^{55}$ см$^{-9}$Па$^{-1/2}$ ($K^0_{V,Pb} = 1{,}6 \cdot 10^{56}$ см$^{-9}$Па$^{-1/2}$, $\Delta H = 0{,}2$ еВ).

На основі аналізу експериментальних (рис. 1, 9) і розрахункових (рис. 1, 3-9) результатів видно, що збільшення парціального тиску пари телуру у зоні осадження обумовлює зменшення початкової концентрації електронів у плівках n-типу, реалізацію n-p-переходу і подальше зростання концентрації дірок (рис. 3). Такий характер спричинений, у першу чергу, інтенсивним зростанням концентрацій вакансій свинцю (рис. 4 – крива 1), які і є акцепторами [2]. За сталого значення пари індію P_{In} при осадженні плівок, концентрація $[In^+_{Pb}]$ у плівках суттєво не змінюється (рис. 4 – крива 2). Збільшення парціального тиску пари індію при вирощуванні плівок PbTe обумовлює протилежні ефекти: для конденсату із початковою дірковою провідністю має місце зменшення концентрації носіїв, реалізація p-n-переходу і подальше зростання концентрації електронів (рис. 1).

При цьому донорна дія індію пов'язана із збільшенням у матеріалі плівки атомних дефектів заміщення індієм вакансій свинцю у кристалічній гратці PbTe $[In^+_{Pb}]$ (рис. 5 – крива 1). Звертає на себе увагу характер зміни вакансій свинцю $[V^{2-}_{Pb}]$ в області значень тисків індію $P_{In} = 10^{-7} - 10^{-6}$ Па (рис. 5 – крива 2). Видно, що концентрація $[V^{2-}_{Pb}]$ зростає аналогічно до концентрації індію $[In^+_{Pb}]$ у плівці. Останнє вказує на те, що має місце явище самокомпенсації, при якому утворення дефектів, пов'язаних із легуючою домішкою компенсується власними атомними дефектами. Зауважимо, що у роботах [10, 11] явище самокомпенсації виявлено при легуванні телуриду і селеніду свинцю талієм. Просторові діаграми залежності холлівської концентрації носіїв струму n_H (рис. 6), та концентрації дефектів $[V^{2-}_{Pb}]$ (рис. 7), $[In^+_{Pb}]$ (рис. 8) від технологічних факторів P_{In}, T_{Te} більш наочно відображають вище відзначені закономірності. Значення тиску індію $P_{In,p\text{-}n}$, що відповідає реалізації p-n-переходу у плівках PbTe:In із підвищенням температури додаткового випарника телуру T_{Te} зростає (рис. 9). Це пов'язано із тим, що за цих умов має місце збільшення концентрації акцепторних вакансій свинцю $[V^{2-}_{Pb}]$, які необхідно компенсувати легуючій домішці.

Таким чином, одержані результати не тільки дають відповідь про механізм взаємодії індію із плівками PbTe, збагаченими на телур, але і визначають технологічні умови і аналітичні залежності, що забезпечують вирощування тонкоплівкового матеріалу із наперед заданими співвідношеннями концентрацій електрично активних власних і домішкових дефектів, а також типом провідності.

VI. Висновки

1. Досліджено вплив домішки індію на електричні властивості епітаксіальних плівок PbTe⟨Te⟩:In, вирощених із парової фази методом гарячої стінки на сколах (111) монокристалів фтористого барію.
2. Методами кристалоквазіхімії показано, що індій, заміщаючи октаедричні порожнини щільної упаковки атомів телуру у кристалічній структурі PbTe (вакансії свинцю), виступає донором і, таким чином, обумовлює зростання концентрації електронів у матеріалі.
3. Запропоновані квазіхімічні реакції утворення ефектів у плівках PbTe⟨Te⟩:In і визначено константи рівноваги.
4. Встановлено залежності холлівської концентрації носіїв струму n_H, а також дефектів (вакансій свинцю $[V^{2-}_{Pb}]$, домішки індію $[In^+_{Pb}]$) від технологічних факторів у методі гарячої стінки.
5. Визначено умови реалізації у плівках PbTe⟨Te⟩:In термодинамічного p-n-переходу.

Д.М. Фреїк *– заслужений діяч науки і техніки України, доктор хімічних наук, професор, директор Фізико-хімічного інституту, завідувач кафедрою фізики твердого тіла;*
Л.Р. Павлюк *– аспірант кафедри фізики;*
М.О. Галущак *– кандидат фізико-математичних наук, професор кафедри фізики;*
В.М. Бойчук *– аспірант кафедри фізики твердого тіла;*
А.М. Яцура *– аспірант кафедри фізики твердого тіла.*

[1] Н.Х. Абрикосов, Л.Е. Шалимова. *Полупроводниковые материалы на основе соединений $A^{IV}B^{VI}$*. Наука, М. (1975).
[2] Д.М. Фреїк, В.В. Прокопів, М.О. Галущак, М.В. Пиц, Г.Д. Матеїк. *Кристалохімія і термодинаміка дефектів у сполуках $A^{IV}B^{VI}$*. Плай, Івано-Франківськ (2000).

[3] Д.М. Заячук, В.А. Шендоровський. Власні дефекти та електронні процеси в $A^{IV}B^{VI}$. *Український фізичний журнал*. **32**(3), сс. 261-272 (1996).
[4] В.Н. Кайданов, Ю.Н. Равич. Глубокие и резонансные состояния в полупроводниках типа $A^{IV}B^{VI}$ // *Успехи физических наук*. **145**(1), сс. 51-86 (1985).
[5] Ю.Н. Равич, С.А. Немов. Прыжковая проводимость по сильно локализованным примесным состояниям индия в PbTe и твердых растворах на его основе // *Физика и техника полупроводников*. **36**(1), сс. 3-23 (2002).
[6] Д.М. Фреик, М.А. Галущак, Л.И. Межиловская. *Физика и технология тонких пленок*. Вища школа, Львів (1988).
[7] С.В. Гладкий, В.И. Руденков, И.В. Саунин, Я.В. Сергеев. Свойства пленок $Pb_{1-X}Sn_XTe$, легированных индием // *Неорганические материалы*. **29**(3), сс. 133-135 (1993).
[8] С.С. Лисняк. Кристаллоквазихимическая модель исследования в химии твердого тела // *Неорганические материалы*, **29**(9), сс. 1913-1917 (1992).
[9] С.А. Семилетов. Тетраэдрические и октаэдрические ковалентные радиусы // *Кристаллография*, **21**(4), сс. 752-758 (1976).
[10] М.К. Житинская, В.Н. Кайданов, С.А. Немов, Л.А. Афанасьева. Особенности явления самокомпенсации в $PbTe\langle Te, Pb_{изб}\rangle$ // *Физика и техника полупроводников*, **22**(11), сс. 2023-2025 (1988).
[11] Л.Н. Бытинский, В.Н. Кайданов, Р.Б. Мельник, С.А. Немов, Ю.Н. Равич. Самокомпенсация акцепторов вакансиями в сульфиде и селениде свинца, легированном талием // *Физика и техника полупроводников*, **14**(1), сс. 74-79 (1980).

D.M. Freik, L.R. Pavlyuk[1], M.O. Galuschak[1], V.M. Boychuk, A.M. Yatsura

Nuclear defects and electrical properties of epitaxial films $PbTe\langle Te\rangle$:In

Vasyl Stefanyk Prekarpathian University,
57, Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk, 76000, Ukraine, E-mail: prk@pu.if.ua
[1]Ivano-Frankivsk National University of the oil and gas,
15, Karpatska Str., Ivano-Frankivsk, 76000, Ukraine

By methods both of crystal-quasichemistry and quasichemistry is analysed the mechanisms of process doping of PbTe films by indium, enriched tellurium. Is established, that the one-charge atoms indium In_{Pb}^{+} The atoms replace of lead in octahedron hollows of tellurium dense packing of PbTe crystalline structure, act by the donors. Is determined constants of an equilibrium and enthalpy of quasichemistry reactions of vacancies of lead $[V_{Pb}^{2-}]$ formation and substitution by indium the atom of lead $[In_{Pb}^{+}]$.