

Д.М. Заячук<sup>1</sup>, О.С. Ільїна<sup>1</sup>, В.І. Микитюк<sup>2</sup>, В.В. Шлемкевич<sup>2</sup>, D. Kaszowski<sup>3</sup>

## Концентрація домішки Європію і магнітні властивості легованих кристалів PbTe:Eu

<sup>1</sup>Національний університет "Львівська політехніка", вул. С. Бандери, 12, Львів, Україна

<sup>2</sup>Чернівецький національний університет ім. Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського, 2, Чернівці, Україна

<sup>3</sup>Institute of Low Temperature and Structure Research, Polish Academy of Sciences,  
50-950 Wrocław 2, P. O. Box 1410, Poland

У широкому діапазоні концентрацій домішки Eu, порядку  $10^{18} - 10^{20} \text{ см}^{-3}$ , в області низьких температур  $1.7 \div 10 \text{ К}$  у діапазоні магнітних полів  $H = 0 \div 5 \cdot 10^4 \text{ Е}$  проведено детальні дослідження польових залежностей намагніченості  $M$  і температурних залежностей магнітної сприйнятливості  $\chi$  легованих кристалів PbTe:Eu. На основі сукупного аналізу залежностей  $M(H)$  і  $\chi(T)$  зроблено висновок про існування в досліджуваних кристалах парамагнітних центрів з нетиповим поєднанням температурної і польової поведінки намагніченості – парамагнітна сприйнятливості центрів не залежить від температури, але зменшується з ростом напруженості магнітного поля. Вклад виявлених центрів у намагніченість легованого PbTe:Eu є суттєвим у випадку низької концентрації домішки Eu. Якщо вміст Eu в кристалах PbTe:Eu переважає величину порядку  $10^{19} \text{ см}^{-3}$ , вплив центрів на магнітні характеристики кристалів маскується високою намагніченістю, спричиненою іонами  $\text{Eu}^{2+}$ . Припускається, що виявленими парамагнітними центрами в кристалах PbTe:Eu є власні дефекти кристалічної ґратки.

**Ключові слова:** PbTe, Європій, домішки, дефекти, намагніченість, магнітна сприйнятливості.

Стаття поступила до редакції 07.02.2014; прийнята до друку 15.06.2014.

### Вступ

Домішки рідкісноземельних елементів (РЗЕ) широко застосовуються у фізиці і технології напівпровідників, а також напівпровідниковому приладобудуванні. Серед численних їх позитивних рис окремо варто виділити здатність РЗЕ очищати напівпровідникові кристали від неконтрольованих фонових домішок і власних дефектів завдяки високій їх хімічній активності і породжуваному нею гетеруючому ефекту, а також можливість керувати в широких межах магнітними параметрами кристалів, плівок і приладних структур завдяки наявності у таких домішок незаповнених внутрішніх  $4f$  оболонки і, відповідно, їх значному спіновому магнітному моменту [1-4]. У зв'язку з неординарністю властивостей РЗЕ поведінка їх домішок у різних напівпровідниках, зокрема у напівпровідниках  $A^{IV}B^{VI}$ , постійно знаходиться у фокусі наукових досліджень [5-9].

Дана робота продовжує розпочаті нами раніше систематичні дослідження поведінки домішки Європію в кристалах телуриду свинцю, вирощуваних з легованих розплавів методом Бріджмена [10-16]. На даний момент встановлено, що при відносно високому вмісті домішки, порядку  $10^{19} \text{ см}^{-3}$  і

вище, магнітні властивості легованих кристалів можуть бути добре пояснені вкладом у намагніченість кристалів від одиночних ізольованих центрів іонів  $\text{Eu}^{2+}$ , їх дрібних комплексів з феро- і антиферомагнітною взаємодією, перш за все, за участю неконтрольованої домішки кисню, а також кристалічної матриці, що включає в себе вклад від вільних носіїв заряду [10, 13-16]. Однак значний інтерес викликає поведінка домішки Європію також при нижчих її концентраціях, особливо зважаючи на особливості сегрегації Європію в PbTe при малій концентрації домішки [5]. На сьогодні такі дані в науковій літературі практично відсутні. У зв'язку з цим ми провели дослідження особливостей формування магнітних властивостей легованих кристалів PbTe:Eu в широкому діапазоні змін концентрації легуючої домішки, включаючи діапазон порядку  $10^{18} \text{ см}^{-3}$ , результати яких наведені нижче.

### І. Зразки для досліджень

Дослідження були проведені на чотирьох порошкових зразках, виготовлених з монокристалічних зливків PbTe:Eu, вирощених методом Бріджмена з розплавів, що містили вихідну концентрацію Європію величиною  $10^{20}$  (Зливок 1),

$10^{19}$  (Зливку 2) і  $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  (Зливку 3). Зважаючи на складний розподіл Європію в такого роду кристалах [5], для однозначності порівнянь три порошокві зразки для досліджень були виготовлені з початкових, порядку 3 мм, конічних частин вирощених зливків. Додатково ще один зразок був виготовлений зі Зливку 1 з тієї його частини, де концентрація  $Eu$  при розподілі домішки вздовж зливку досягає максимуму. Ми нумеруватимемо ці зразки у порядку зменшення реальної концентрації домішки  $Eu$  в них, яка слідує з результатів магнітних вимірювань. Таким чином, Pat 1 і Pat 2 – це зразки, виготовлені зі Зливку 1 з області максимуму концентрації  $Eu$  в зливку і з його початкової конічної частини, Pat 3 і Pat 4 – це зразки з початкових конічних частин Зливків 2 і 3 відповідно.

Досліджували намагніченість і магнітну сприйнятливість (МС) зразків. Магнітні вимірювання були проведені в температурному діапазоні 1,7–10 К в магнітних полях до 50 кЕ, використовуючи SQUID магнітометр MPMS-5.

## II. Експериментальні результати та їх обговорення

Польові залежності намагніченості досліджених зразків при температурі 1,72 К і температурні залежності МС в магнітних полях 1000 Е (Pat 1) і 300 Е (Pat 2-4) наведені на рис. 1 і 2 відповідно.

Як бачимо, намагніченість зразків Pat 1 – Pat 3, виготовлених зі зливків з вихідною концентрацією домішки  $Eu$  в розплаві  $10^{20}$  і  $10^{19} \text{ см}^{-3}$ , з ростом індукції магнітного поля монотонно зростає і виходить на насичення в магнітних полях, більших за 20 кЕ. Намагніченість зразка Pat 4, виготовленого зі зливку з вихідною концентрацією домішки  $Eu$  в розплаві  $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , змінюється немонотонно зі зміною напруженості магнітного поля. Вона проходить через максимум в магнітних полях порядку 8 кЕ, а в області полів порядку 25 кЕ змінює знак з додатного на від’ємний (рис. 1). Магнітна сприйнятливість всіх зразків у слабких магнітних полях в області досліджених температур парамагнітна і монотонно зменшуються з ростом температури (рис. 2).

Отримані залежності  $M(H)$  і  $\chi(T)$  однозначно засвідчують, що всі досліджені зразки містять легуючу домішку Європію і що її концентрація в різних зразках є суттєво різною. Для кількісних і якісних висновків були проведені оцінки величини цієї концентрації шляхом узгодженої теоретичної обробки польових залежностей намагніченості і температурних залежностей магнітної сприйнятливості. Для цього ми використовували стандартною процедуру [17, 18]. Відповідно до неї намагніченість і магнітну сприйнятливість зразка можна розрахувати як:

$$M = M_S + M_{P1} + M_{P2} + c_{Matrix}^{(0)}H, \quad (1)$$

$$X = M/H \quad (2)$$

Тут  $M_S$  – вклад одиночних (Single) центрів:

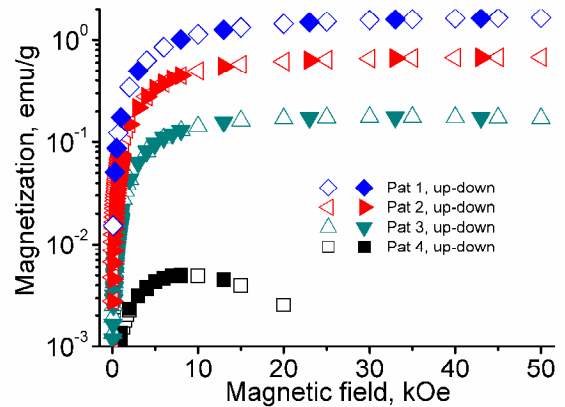


Рис. 1. Магнітопольові залежності намагніченост зразків  $PbTe:Eu$  при температурі 1,72 К. Світлі символи – зростання напруженості магнітного поля (up), темні символи – зниження напруженост магнітного поля (down).

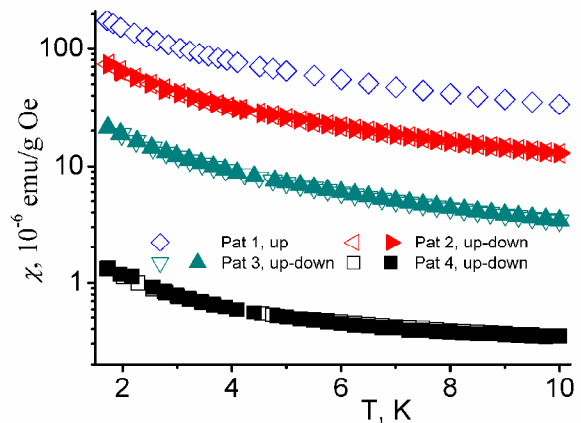


Рис. 2. Температурні залежності магнітної сприйнятливості зразків  $PbTe:Eu$  в магнітному полі 1000 Е (Pat 1) і 300 Е (Pat 2 – Pat 4). Світлі символи – зростання температури (up), темні символи – зниження температури (down).

$$M_S = M_0 S_0 x_{SAT} B_{S_0}(x), \quad (3)$$

де  $M_0 = g\mu_B N_A / m(x_{SAT})$ ,  $g$  – фактор Ланде,  $\mu_B$  – магнетон Бора,  $N_A$  – число Авогадро,  $m(x_{SAT})$  – молярна маса сполуки,  $x_{SAT}$  – мольна доля  $Eu^{2+}$ ,  $S_0$  – спин іона,  $x = S_0 g\mu_B B / k_B T$ ,  $k_B$  – стала Больцмана,  $B_{S_0}(x)$  – функція Бріллюена:

$$B_{S_0}(x) = \frac{2S_0 + 1}{2S_0} \coth\left(\frac{2S_0 + 1}{2S_0} x\right) - \frac{1}{2S_0} \coth\left(\frac{x}{2S_0}\right) \quad (4)$$

$M_{P1}$  і  $M_{P2}$  – вклади пар найближчих сусідів (NN pairs) і сусідів, наступних за найближчими (NNN pairs):

$$M_{Pi} = \frac{1}{2} M_{Ox_i} \frac{\sum_{S=0}^{S_{\max}} \exp\left[\frac{J_i}{k_B T} S(S+1)\right] S \left[ \sinh\left[\frac{2S+1}{2S} x_p\right] \right] B_S(x_p)}{\sum_{S=0}^{S_{\max}} \exp\left[\frac{J_i}{k_B T} S(S+1)\right] \left[ \sinh\left[\frac{2S+1}{2S} x_p\right] \right]}, \quad i = 1, 2, \quad (5)$$

де  $x_p = S g m_B B / k_B T$  і  $S_{\max} = 2S_0$ ,  $J_i$  – інтеграли феромагнітної ( $i = 1$ ) і антиферомагнітної ( $i = 2$ ) взаємодії найближчих і наступних за найближчими іонів  $Eu^{2+}$  відповідно, які, згідно з [14], брались рівними  $J_1 = +0,056k_B$ ,  $J_2 = -0,13k_B$ , а  $c_{Matrix}(0)$  – магнітна сприйнятливості кристалічної матриці при  $T \rightarrow 0$  К.

Порівняння експериментальних і розрахункових залежностей  $M(H)$  і  $\chi(T)$  досліджених зразків показано на рис. 3-6. Значення параметрів, за яких досягається найкраща збіжність між експериментальними і розрахунковими кривими, наведені в таблиці 1.

Деякі результати кількісної обробки експериментальних даних заслуговує на особливу увагу.

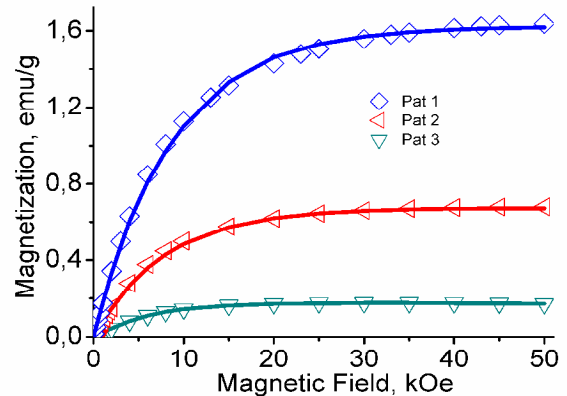
Перш за все бачимо, що узгодження експериментальних і розрахункових залежностей  $M(H)$  і  $\chi(T)$  зразків Pat 1 – Pat 3, реальна концентрація домішки  $Eu$  в яких переважає  $10^{19} \text{ см}^{-3}$ , досягається за одного і того ж значення параметра магнітної сприйнятливості кристалічної матриці  $c_{Matrix}(0) = -0,41 \cdot 10^{-6} \text{ emu/g Oe}$ , що лежить у межах типових значень цього параметра для кристалів  $PbTe$  [10]. Тут необхідно зазначити, що за таких концентрацій домішки  $Eu$  до величини  $c_{Matrix}(0)$  більш чутливою є польова залежність намагніченості, ніж

**Таблиця 1**

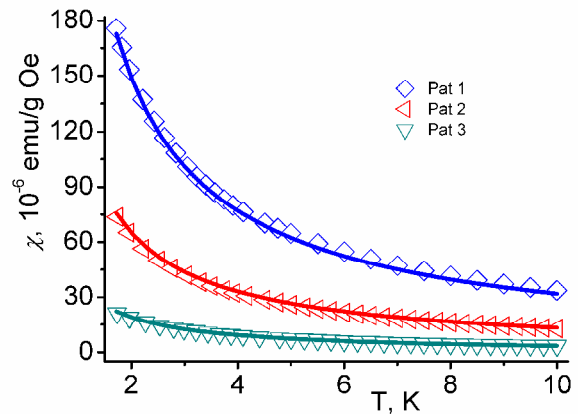
Параметри, за яких розрахункові залежності  $M(H)$  (а для зразків Pat 1–Pat 3 – одночасно і розрахункові залежності  $\chi(T)$ ) найкраще відтворюють експеримент

Параметр	Pat 1	Pat 2	Pat 3	Pat 4
$c_{Matrix}(0)$ , $10^{-6} \text{ emu/g Oe}$	-0,41	-0,41	-0,41	-0,52
$N_{Eu}(\text{Single})$ , $\text{см}^{-3}$	0	$2,4 \cdot 10^{19}$	$2,5 \cdot 10^{19}$	$6,3 \cdot 10^{17}$
$N_{Eu}(\text{NN pairs})$ , $\text{см}^{-3}$	$1,14 \cdot 10^{20}$	$3,6 \cdot 10^{19}$	0	$1,0 \cdot 10^{18}$
$N_{Eu}(\text{NNN pairs})$ , $\text{см}^{-3}$	$9,6 \cdot 10^{19}$	$2,9 \cdot 10^{19}$	0	0
$N_{Eu}(\text{Total})$ , $\text{см}^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{20}$	$8,9 \cdot 10^{19}$	$2,5 \cdot 10^{19}$	$1,63 \cdot 10^{18}$

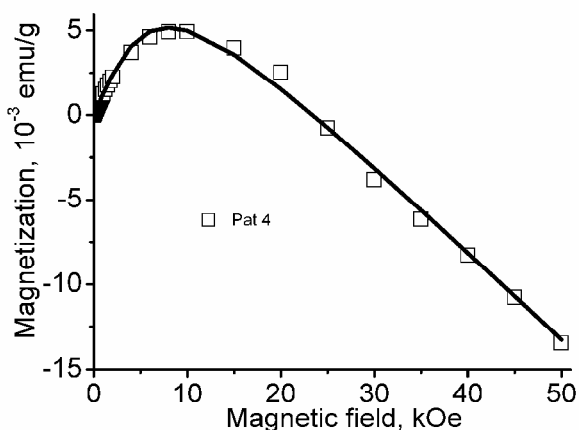
температурна залежність магнітної сприйнятливості. Це є наслідком того, що проведені польові дослідження простираються в область сильних магнітних полів аж до 50 кЕ, за яких вклад у сумарну намагніченість зразків від кристалічної ґратки  $c_{Matrix}(0) \times H$  за отриманої її магнітної сприйнятливості сягає  $-0,2 \text{ emu/g}$ . Це є суттєва величина на фоні експериментальних значень сумарної намагніченості досліджуваних зразків, які в полі 50 кЕ знаходяться в діапазоні значень  $0,17 \div 1,6 \text{ emu/g}$  (рис. 3). У той же час абсолютне значення магнітної сприйнятливості кристалічної



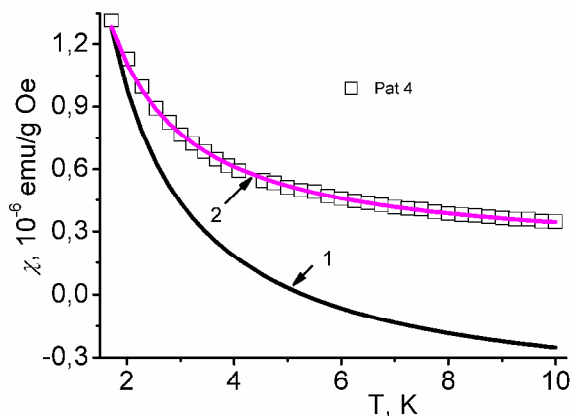
**Рис. 3.** Магнітопольові залежності намагніченості зразків  $PbTe:Eu$  Pat 1 – Pat 3. Символи – експеримент, лінії – розрахунок за параметрів зразків, наведених в Таблиці 1.  $T = 1,72$  К.



**Рис. 4.** Температурні залежності магнітної сприйнятливості зразків  $PbTe:Eu$  Pat 1 – Pat 3. Позначення ті ж, що на рис. 3.



**Рис. 5.** Магнітопольова залежність намагніченості зразка Pat 4. Символи – експеримент, крива – розрахунок за параметрів зразка, наведених в Таблиці 1.  $T = 1,72$  К.



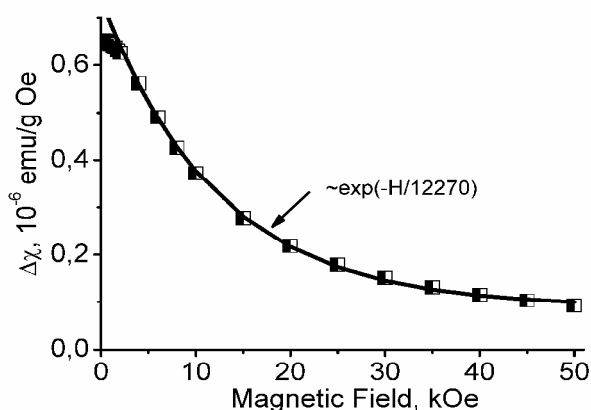
**Рис. 6.** Температурна залежність магнітної сприйнятливості зразка  $PbTe:Eu$  Pat 4. Символи – експеримент, крива 1 – розрахунок за параметрів зразка, наведених в таблиці 1, крива 2 – розрахунок за умови, що  $N_{Eu}(\text{Single})$  і  $N_{Eu}(\text{NN pairs})$  становлять 63,5% від величин, наведених у таблиці 1, а  $c_{Matrix}(0) = +0,18 \cdot 10^{-6}$  emu/g Oe.

матриці в усьому діапазоні температур значно поступається загальній магнітній сприйнятливості зразків у слабких магнітних полях, в яких проводяться такі вимірювання, що лежить в межах  $(3,5 \div 175) \cdot 10^{-6}$  emu/g Oe (рис. 4). Попри те, врахування вкладу від одиночних центрів і пар іонів домішки  $Eu^{2+}$  у різних їх комбінаціях разом з вкладом кристалічної матриці за одного і того ж самого набору параметрів дозволяє дуже добре описати як польові залежності намагніченості, так температурні залежності магнітної сприйнятливості зразків Pat 1 – Pat 3.

У той же час для зразка Pat 4, реальна концентрація домішки  $Eu$  в якому знаходиться на значно нижчому рівні порядку  $10^{18}$  см<sup>-3</sup> (таблиця 1), ситуація абсолютно інша. Щоб описати польову залежність його намагніченості вкладом зазначених

вище чинників (рис. 5), необхідно припустити неймовірно високу (по модулю) магнітну сприйнятливості його кристалічної матриці  $(-0,52 \cdot 10^{-6}$  emu/g Oe (таблиця 1)) – значення, яке раніше ніде не зустрічалось в літературі. Більше того, таким набором магнітних чинників і їх кількісних параметрів не вдається відтворити температурну залежність магнітної сприйнятливості зразка, яка за таких умов мала би бути набагато сильнішою, ніж залежність, що спостерігається на експерименті (рис. 6, крива 1). В останньому випадку дуже доброго збігу розрахунку з експериментом можна досягти, припустивши, що реальна концентрація іонів  $Eu^{2+}$  в зразку на 36,5 % нижча, ніж це слідує з наведеної на рис. 5 теоретичної обробки польової залежності намагніченості, зате магнітна сприйнятливості кристалічної матриці додатна і становить  $+0,18 \cdot 10^{-6}$  emu/g Oe (крива 2, рис. 6). Але останній результат явно суперечить наведеної на рис. 5 польовій залежності намагніченості, а саме інверсії її знаку з додатного на від'ємний при зростанні магнітного поля, яка однозначно засвідчує, що кристалічна матриця зразка Pat 4 діаманітна.

Такі розбіжності щодо вкладу кристалічної матриці досліджуваного зразка у польову залежність його намагніченості і температурну залежність магнітної сприйнятливості наводять на думку, що ця матриця містить додаткові парамагнітні центри, які дають незалежний від температури, але такий, що зменшується з ростом магнітного поля, парамагнітний вклад у сумарну магнітну сприйнятливості зразка. У подальшому для лаконічності називатимемо їх X-центрами. Щоб перевірити цю гіпотезу й оцінити можливий характер польової залежності намагніченості прогнозованих X-центрів, ми розраховували різницеву намагніченість  $\Delta\chi$  для двох модельних зразків з концентраціями іонів  $Eu^{2+}$ , які впливають з кількісних обробок кривих  $M(H)$  і  $\chi(T)$  для Pat 4, наведених на рис. 5 і 6. Відповідно до цього, для одного з них концентрації іонів були покладені рівними  $N_{Eu}(\text{Single}) = 6,3 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>,  $N_{Eu}(\text{NN pairs}) = 1,0 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup> (таблиця 1), а для іншого – 63,5 % від цих величин. Польова



**Рис. 7.** Магнітопольова залежність різницевої намагніченості модельних зразків (пояснення дивись у тексті).

залежність цієї різницевої намагніченості наведена на рис. 7.

Як бачимо з рис. 7, розрахована різницева намагніченість дійсно зменшується з ростом магнітного поля, причому характер такого зменшення нагадує експоненту. Виходячи з цього, ми апроксимували польову залежність магнітної сприйнятливості прогнозованих X-центрів  $\chi_x$  співвідношенням:

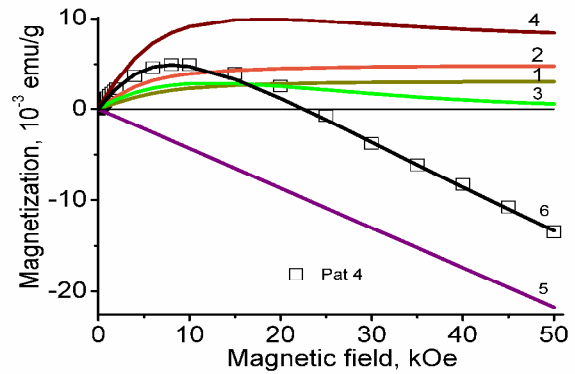
$$c_x = A \exp\left(-\frac{H}{B}\right), \quad (6)$$

з незалежними від температури параметрами  $A$  і  $B$ . Значення цих параметрів повинно було забезпечувати добре узгодження експериментальної і розрахункової польових залежностей намагніченості зразка Pat 4 в усьому діапазоні досліджених магнітних полів, а в магнітному полі 300 Е – необхідне значення додатної добавки до магнітної сприйнятливості кристалічної ґратки для відтворення температурної залежності магнітної сприйнятливості зразка в цьому полі, тобто в сумі з  $c_{Matrix}(0)$  – зазначене вище значення  $+0,18 \cdot 10^{-6}$  emu/g Oe.

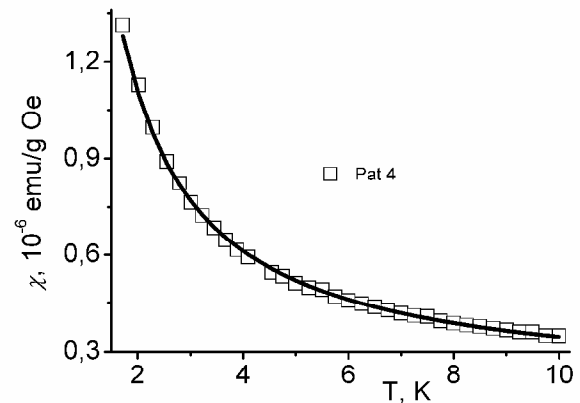
Врахування вкладу прогнозованих X-центрів дозволило дуже добре узгоджено відтворити польову залежність намагніченості і температурну залежність магнітної сприйнятливості зразка Pat 4 (рис. 8 і 9). Для найкращого узгодження розрахунку з експериментом необхідно припустити, що параметри співвідношення (6)  $A$  і  $B$  становлять  $0,63 \cdot 10^{-6}$  emu/g Oe і 12 500 Е відповідно,  $N_{Eu}(\text{Single}) = 3,9 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>,  $N_{Eu}(\text{NN pairs}) = 6,2 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>,  $c_{Matrix}(0) = -0,435 \cdot 10^{-6}$  emu/g Oe. Останнє значення є дуже близьким до відповідної величини для решти досліджених зразків і відповідає магнітній сприйнятливості кристалічної матриці найбільш досконалих кристалів PbTe [10, 19].

З рис. 8 бачимо, що за таких концентрацій домішки Eu в кристалах PbTe:Eu вклад X-центрів у загальну намагніченість зразка в області малих магнітних полів домінує над вкладом одиночних центрів іонів Eu<sup>2+</sup>. Водночас в області великих значень магнітних полів домінуючим є вже вклад різних центрів іонів Eu<sup>2+</sup>. Разом це веде до немонотонної залежності з максимумом сумарної сприйнятливості всіх парамагнітних складових з ростом магнітного поля (крива 4, рис. 8). Це пояснює, чому врахування вкладу тільки іонів Eu<sup>2+</sup> у польову залежність намагніченості зразка Pat 4 приводить до завищення (за модулем) значення магнітної сприйнятливості кристалічної матриці  $c_{Matrix}(0)$  (таблиця 1). Для зразків Pat 1 – Pat 3, реальна концентрація Європію в яких на порядок-два вища, ніж у зразку Pat 4, вклад іонів Eu<sup>2+</sup> у їх сумарну намагніченість дуже сильно переважає парамагнітний вклад X-центрів, тому останній маскується як у польовій залежності намагніченості, так у температурній залежності магнітної сприйнятливості.

На нашу думку, отримані результати дають всі



**Рис. 8.** Експериментальна і розрахункові залежності намагніченості зразка Pat 4 при температурі 1,72 К. Символи – експеримент; криві – розрахунок для: 1 – одиночних центрів іонів Eu<sup>2+</sup> ( $N_{Eu}(\text{Single}) = 3,9 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>); 2 – пар найближчих сусідів ( $N_{Eu}(\text{NN pairs}) = 6,2 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>); 3 – X-центрів (параметри  $A = 0,63 \cdot 10^{-6}$  emu/g Oe,  $B = 12\,500$  Е); 4 – суми вкладів 1, 2 і 3; 5 – кристалічної матриці; 6 – сумарного вкладу всіх зазначених чинників.



**Рис. 9.** Експериментальна і розрахункові залежності магнітної сприйнятливості зразка Pat 4 за тих же значень параметрів, що на рис. 8.  $H = 300$  Е.

підстави обґрунтовано припускати, що в кристалах PbTe:Eu насправді існують парамагнітні центри з нетиповою парамагнітною сприйнятливостю, яка не залежить від температури, але дуже сильно зменшується з ростом магнітного поля. Незалежність магнітної сприйнятливості таких центрів від температури однозначно вказує на те, що це не є центри, спричинені іонами Європію, інакше їх магнітна сприйнятливості мала би зменшуватися з температурою відповідно до законів Кюрі чи Кюрі-Вейса. Тоді, за відсутністю альтернативи, приходиться стверджувати, що ці центри спричиняються власними дефектами самої кристалічної матриці телуриду свинцю. У такому разі вони повинні би спостерігатися і в нелегованих кристалах PbTe. Ми сподіваємося, що дослідження таких кристалів у широкому діапазоні магнітних полів, з особливою деталізацією результатів в області

слабких і дуже слабких полів, дозволять прояснити цю ситуацію.

## Висновки

Досліджено польові залежності намагніченості і температурні залежності магнітної сприйнятливості кристалів *PbTe:Eu*, вирощених з легованих розплавів методом Бріджмена. Діапазон досліджених концентрацій домішки *Eu* –  $10^{18} \div 10^{20}$  см<sup>-3</sup>, діапазон досліджених температур –  $1,7 \div 10$  К, діапазон досліджених магнітних полів –  $0 \div 5 \cdot 10^4$  Е. Показано, що для узгодженої кількісної інтерпретації цих залежностей поряд з відомим вкладом одиночних центрів та пар домішок *Eu* з феромагнітною та антиферомагнітною взаємодією, а також діамагнітної кристалічної матриці необхідно взяти до уваги додатковий парамагнітний вклад, імовірно власних дефектів кристалічної ґратки телуриду свинцю. Вклад цих центрів проявляє себе в магнітних властивостях легованих кристалів, якщо концентрація легуючої домішки *Eu* є не надто великою, порядку  $10^{18}$  см<sup>-3</sup>. Якщо вміст *Eu* в кристалах *PbTe:Eu* переважає величину порядку  $10^{19}$  см<sup>-3</sup>, вплив центрів на магнітні характеристики

кристалів маскується значною намагніченістю, спричиненою іонами *Eu*<sup>2+</sup>. Парамагнітна сприйнятливість прогнозованих центрів не залежить від температури, але зменшується з ростом напруженості магнітного поля. Показано, що добрим наближенням для польової залежності магнітної сприйнятливості  $\chi_x$  таких центрів є експоненційна залежність типу  $c_x = A \exp(-\frac{H}{B})$  з незалежними від температури параметрами *A* і *B*.

**Заячук Д.М.** - доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри електронних засобів інформаційно-комп'ютерних технологій;  
**Ільїна О.С.** - магістр, аспірант кафедри електронних засобів інформаційно-комп'ютерних технологій;  
**Микитюк В.І.** - кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри електроніки і енергетики;  
**Шлемкевич В.В.** - асистент кафедри електроніки і енергетики;  
**Dariusz Kaczorowski** - Doctor of Science, Professor, Head of Magnetic Research Division, Deputy Director for Scientific Affairs.

- [1] V.F. Masterov, FTP 27, 1435 (1993).
- [2] V.I. Mikityuk, D.M. Zayachuk, P.M. Starik, V.I. Garasim, V.P. Krasnodemskii, Inorganic materials 31, 1197 (1995).
- [3] B.M. Pinczolit, G. Springholz, and G. Bauer, Phys. Rev. B 60, 11524 (1999).
- [4] E. Smajek, M. Szot, L. Kowalczyk, V. Domukhovski, B. Taliashvili, P. Dziawa, W. Knoff, E. Łusakowska, A. Reszka, B. Kowalski, M. Wiater, T. Wojtowicz, T. Story, J. Cryst. Growth 323, 140 (2011).
- [5] D.M. Zayachuk, O.S. Ilyina, A.V. Pashuk, V.I. Mikityuk, V.V. Shlemkevych, A. Csik, and D. Kaczorowski, J. Cryst. Growth 376, 28 (2013).
- [6] Thiess, P. H. Dederichs, R. Zeller, S. Blügel, and W. R. L. Lambrecht, Phys. Rev. B 86, 180401(R) (2012).
- [7] E. Zvereva, O. Savelieva, S. Ibragimov, Ya. Titov, E. Slyn'ko, V. Slyn'ko, Solid State Phenomena 168, 376 (2011).
- [8] A. Łusakowski, M. Górska, J.R. Anderson, Y. Dagan, Z. Gołacki, J. Phys.: Condensed Matter 21, 265802 (2009).
- [9] V. Jovovic, S. J. Thiagarajan, J. West, J. P. Heremans, T. Story, Z. Golacki, W. Paszkowicz, and V. Osinniy, J. Appl. Phys. 102, 043707 (2007).
- [10] D.M. Zayachuk, V.I. Mikityuk, V.M. Frasunyak, and V.V. Shlemkevych, J. Cryst. Growth 311, 4670 (2009).
- [11] D.M. Zayachuk, JMMM 322, 60 (2010).
- [12] D.M. Zayachuk, V.I. Mikityuk, V.V. Shlemkevych, D. Kaczorowski, and O.S. Ilyina, Physica C 483, 1 (2012).
- [13] D.M. Zayachuk, V.I. Mikityuk, A.V. Pashuk, V.V. Shlemkevych, K.S. Ulyanitsky and D. Kaczorowski, Journal of Physical Studies 16, 1703 (2012).
- [14] D.M. Zayachuk, V.I. Mikityuk, V.V. Shlemkevych, and D. Kaczorowski, J. Cryst. Growth 338, 35 (2012).
- [15] D.M. Zayachuk, O.S. Ilyina, V.I. Mikityuk, V.V. Shlemkevych, D. Kaczorowski, and A. Csik, Physics and Chemistry Solid State 14, 726 (2013).
- [16] D.M. Zayachuk, O.S. Ilyina, D. Kaczorowski, V.I. Mikityuk, and V.V. Shlemkevych, Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics, 16, 336 (2013).
- [17] J.R. Anderson, G. Kido, Y. Nishina, M. Górska, L. Kowalczyk, and Z. Golacki, Phys. Rev. B 41, 1014 (1990).
- [18] S. Isber, S. Charar, C. Fau, V. Mathet, M. Averous, and Z. Golacki, Phys. Rev. B 52, 1678 (1995).
- [19] P.M. Starik, V.I. Mikityuk, D.M. Zayachuk, R.D. Ivanchuk, FTP 18, 2101 (1984).

D.M. Zayachuk<sup>1</sup>, O.S. Ilyina<sup>1</sup>, V.I. Mikityuk<sup>2</sup>, V.V. Shlemkevych<sup>2</sup>, D. Kaczorowski<sup>3</sup>

## Concentration of Europium Impurity and Magnetic Properties of PbTe:Eu Doped Crystals

<sup>1</sup>Lviv Polytechnic National University, 12 Bandera St, Lviv, Ukraine

<sup>2</sup>Yuri Fedkovich Chernivtsy National University, 2 Kotsyubynsky St, Chernivtsy, Ukraine

<sup>3</sup>Institute of Low Temperature and Structure Research, Polish Academy of Sciences, 50-950 Wroclaw 2, P. O. Box 1410, Poland

Both magnetic field dependences of magnetization  $M$  and temperature dependences of magnetic susceptibility  $\chi$  of the  $PbTe:Eu$  doped crystals are detail investigated at the wide range of  $Eu$  impurity concentration  $10^{18}-10^{20} \text{ cm}^{-3}$  under low temperatures  $1.7-10 \text{ K}$  in magnetic field range  $H = 0-5 \cdot 10^4 \text{ Oe}$ . Based on the combined analysis of the  $M(H)$  and  $\chi(T)$  dependences it is suggested the existence in the studied crystals of paramagnetic centers with unusual combination of temperature and field behavior of the magnetization when paramagnetic centers susceptibility is independent of temperature but decreases with increasing of magnetic field. The contribution of the identified centers in the magnetization of doped  $PbTe:Eu$  is essential in the case of low concentration of  $Eu$  impurity. If the concentration of  $Eu$  in  $PbTe:Eu$  crystals dominates the order of  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , the impact of the centers on the magnetic properties of the crystals is masked by high magnetization induced by  $Eu^{2+}$  ions. It is suggested that the native defects of crystal lattice can be the observed paramagnetic centers in  $PbTe:Eu$  crystals.