

до утворення мілких донорних рівнів в забороненій зоні матеріалу та значного зростання концентрації вільних носіїв. Легування Cu та Cd приводить до істотного пониження, а йодом – до зростання електропровідності впоперек шарів.

1. Micocci G., Tepore A., Rella R., Siciliano P. // *Phys. Stat. Sol.* – 1991. – **126A**. – P. 437–442.
2. De Blasi C., Drigo A.V., Micocci G., Tepore A. // *J. Cryst. Growth*. – 1989. – **94**. – P. 455–458.
3. Julien C., Eddrief M., Balkanski M., Hatrikraniotis E., Kambas K. // *Phys. Stat. Sol.* – 1985. – **88A**. – P. 687–695.
4. Julien C., Balkanski M. // *Mater. Sci. Eng.* – 1996. – **B38**, № 1. – P. 1–8.

УДК 621.315.592

Д.М. Заячук, В.І. Кемпник*, Є.О. Полигач, Є.І. Слинко**, О.Г. Хандожко***
 Національний університет “Львівська політехніка”,
 кафедра напівпровідникової електроніки,
 *НВО "Карат",
 **Чернівецьке відділення ІПМ НАН України
 ***Чернівецький Національний Університет,
 кафедра радіотехніки

ОСОБЛИВОСТІ ЕПР АКТИВНОСТІ ДОМІШКИ ГАДОЛІНІЮ В КРИСТАЛАХ ТВЕРДИХ РОЗЧИНІВ ТЕЛУРИДІВ СВИНЦЮ І ОЛОВА

© Заячук Д.М., Кемпник В.І., Полигач Є.О., Слинко Є.І., Хандожко О.Г., 2002

D.M. Zayachuk, V.I. Kempnyk, Ye.O. Polyhach, E.I. Slynko, O.G. Khandozhko
**PARTICULARITIES OF EPR ACTIVITY OF GADOLINIUM IMPURITY IN
 LEAD AND TIN TELLURIDES SOLID SOLUTION CRYSTALS**

© Zayachuk D.M., Kempnyk V.I., Polyhach Ye.O., Slynko E.I., Khandozhko O.G., 2002

Проведено експериментальні дослідження спектрів ЕПР кристалічних і порошкоподібних зразків $p\text{-Pb}_{1-x-y}\text{Sn}_y\text{Gd}_y\text{Te}$ ($x = 0,2$, $y = 0,01$). Вперше показано, що розтирання зразків досліджуваних матеріалів у порошок, а також їх низькотемпературний відпал переводить іони домішки Gd з ЕПР неактивного стану Gd^{2+} у ЕПР активний стан Gd^{3+} , в той час як високотемпературний відпал гасить сигнал ЕПР іонів Gd. Одержані експериментальні результати інтерпретуються на основі моделі, згідно з якою зарядовий стан Gd^{3+} домішки гадолінію в телуридах свинцю і олова є складовою частиною комплексу "домішка заміщення Gd – вакансія Te"

EPR experimental study of both crystalline and powder $p\text{-Pb}_{1-x-y}\text{Sn}_y\text{Gd}_y\text{Te}$ samples ($x = 0,2$, $y = 0,01$) has been carried out. First it was shown, that grinding investigated materials into powder as well as their low-temperature annealing turns Gd impurity ions from EPR non-active Gd^{2+} state to EPR Gd^{3+} one, whereas high-temperature

annealing quenches EPR signal from Gd ions. Obtained experimental results are discussed within the model, according to which Gd^{3+} charge state of the Gd impurity ions in lead and tin tellurides is the component part of the "substituting Gd impurity – Te vacancy" complex.

Вступ. Поведінка і можливості практичного використання домішок рідкісноземельних елементів для цілеспрямованого керування властивостями напівпровідникових кристалів і плівок знаходиться у фокусі фундаментальних і прикладних досліджень протягом останніх двох десятиріч [1–4]. Один із аспектів цієї проблеми, а саме поведінка домішки гадолінію у порівняно збагачених оловом кристалах твердих розчинів $Pb_{1-x}Sn_xTe$, є предметом вивчення даної роботи, що продовжує розпочаті раніше систематичні дослідження впливу Gd на фізичні властивості напівпровідників групи A^4B^6 [4–8].

Поведінка гадолінію в досліджуваних матеріалах у багатьох відношеннях нетривіальна, а його використання дає змогу ефективно керувати структурними, оптичними, електрофізичними параметрами телуридів свинцю і олова. Зокрема легування гадолінієм приводить до зменшення концентрації дірок в кристалах $Pb_{1-x}Sn_xTe$ в усьому діапазоні складів від 0 до 1, яке при певних концентраціях домішки N_{Gd} і складу x матриці супроводжується інверсією типу провідності кристалів з діркової на електронну [3–6]. Донорна дія Gd різними авторами пояснюється по-різному – або електричною активністю самої домішки [3, 9], або її опосередкованою дією через зміну домінуючих у точці кристалізації власних точкових дефектів під впливом гадолінію на користь вакансій у підгратці халькогену [5–7], які в досліджуваних матеріалах є двозарядними донорами з нульовою енергією активації [10]. Перший механізм донорної дії Gd передбачає обов'язкове існування донорних центрів домішки в зарядовому стані Gd^{3+} з концентрацією, не нижчою за концентрацію вільних електронів у легованих кристалах, що, як правило, не спостерігається експериментально [7]. Згідно з альтернативною моделлю [5–7] існування зарядового стану Gd^{3+} є необов'язковим для донорної дії гадолінію. В той же час дослідження ЕПР засвідчують, що такий зарядовий стан домішки гадолінію реалізується в легованих кристалах $PbTe$ [7, 8, 11], хоча імовірність його появи залежить від багатьох факторів, зокрема від типу провідності легованих кристалів, а концентрація іонів у зарядовому стані Gd^{3+} завжди значно (на порядки) нижча за сумарну концентрацію домішки [6, 7]. Для пояснення всього комплексу експериментальних результатів у [6] була запропонована модель, згідно з якою зарядовий стан Gd^{3+} у кристалах телуридів свинцю і олова – це складова частина комплексу "домішка заміщення Gd – вакансія телуру V_{Te} ". Як будь-яка модель, вона вимагає свого всебічного підтвердження. Пошуки додаткових експериментальних доказів на її користь є основним змістом проведених у даній роботі досліджень.

Ідея експерименту і вибір об'єкта досліджень. Основна ідея постановки експерименту полягала в такому. Оскільки згідно з моделлю [6] виникнення зарядового стану Gd^{3+} домішки гадолінію в кристалах телуридів свинцю і олова передбачає наявність вакансій Te , а сам зарядовий стан Gd^{3+} легко може бути зафіксований за допомогою ЕПР, то найефективніший шлях перевірки моделі полягає саме у проведенні експериментальних досліджень ЕПР на зразках, які би у вихідному стані мали концентрацію Gd , достатньо високу для її визначення традиційними методами кількісного аналізу, і гарантовано низькою концентрацією вакансій Te . Змінюючи надалі величину останньої на фоні незмінної

величини першої, можна було би прослідкувати вплив вакансій телуру на ЕПР активність гадолінію, якщо він існує. Виконання першої умови може бути проконтрольоване за допомогою кількісного електронно-зондового мікроаналізу (ЕЗМА), другої – за типом провідності кристалів, оскільки домінування вакансій Те приводить до електронної провідності $Pb_{1-x}Sn_xTe$, а надлишок Te – до діркової [10]. Зручними об'єктами для перевірки правильності моделі є збагачені оловом тверді розчини $Pb_{1-x}Sn_xTe$. Збагачення повинно бути досить значним, щоб p - n -інверсія типу провідності легованих кристалів відбувалась при достатньо високій концентрації гадолінію N_{Gd} . З іншого боку, воно повинно бути достатньо малим, щоб не надто утруднювати можливість вирощування із розплавів досконалих монокристалічних зливоків. Останнє важливо, оскільки ЕПР дуже чутливий до орієнтації магнітного поля відносно кристалічних осей кристала. Враховуючи сказане, для досліджень був вибраний твердий розчин $Pb_{1-x-y}Sn_xGd_yTe$ складу $x = 0,2$, $y = 0,01$, який дозволив забезпечити виконання перерахованих вище умов проведення експерименту.

Кристали для досліджень були вирощені вертикальним методом Бріджмена. Внаслідок специфіки сегрегації домішки, гадоліній головним чином концентрувався у початковій частині зливку, що зумовлювало електронний тип її провідності. Кінцева частина зливку при $N_{Gd} < 8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ мала діркову провідність. Зливков для досліджень розрізався на диски, паралельні площині сколу типу (100). Оскільки ця площина не є перпендикулярною до осі росту кристала, в результаті було одержано декілька дисків, одна частина кожного з яких мала провідністю n -, інша – p -типу. Характер розподілу домішки вздовж таких дисків на прикладі одного із них, на якому були проведені найбільш детальні дослідження ЕПР, ілюструє рис. 1.

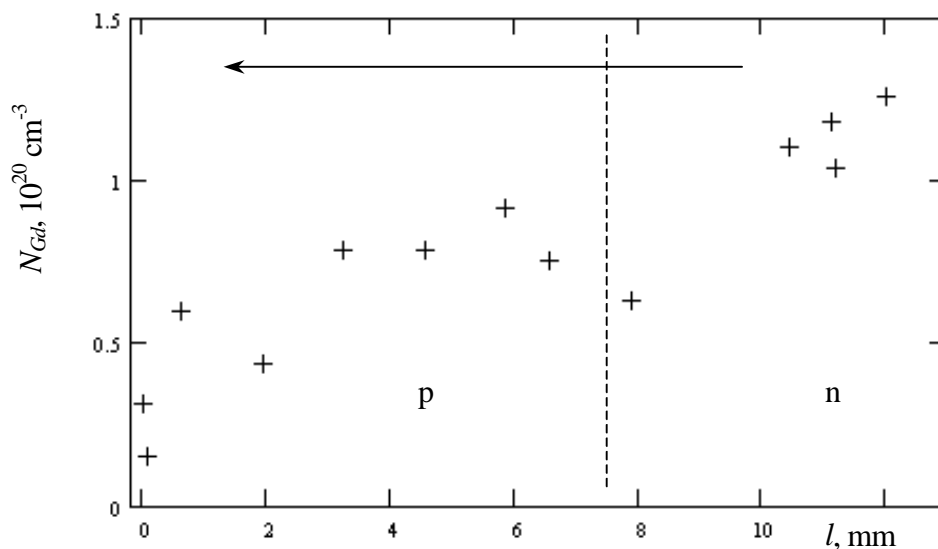


Рис. 1. Розподіл за даними "Сатебах" концентрації Gd вздовж одного із дисків $Pb_{1-x-y}Sn_xGd_yTe$ ($x = 0,2$, $y = 0,01$), на якому проводились основні дослідження ЕПР. Штрихова лінія показує положення ростового p - n -переходу, стрілка показує напрям росту кристала

Основні дослідження були проведені на зразках p -типу провідності із області кристалічного зливку, близької до ростового p - n -переходу. Зважаючи на зазначену вище ідею

постановки експерименту, останній був спрямований на дослідження вихідних зразків, виготовлених із свіжовирощеного зливку, а також таких, які піддавались обробці, що могла приводити до суттєвої зміни концентрації вакансій *Te*. Для досягнення таких змін було застосовано два принципово різні підходи: ізотермічний відпал зразків і розтирання їх у порошок.

Щодо відпалу досліджуваних матеріалів, то він може приводити як до зростання, так і до зменшення кількості вакансій *Te* в кристалах залежно від температурного режиму відпалу. Згідно з класичними дослідженнями Скенлона [12], низькотемпературний відпал приводить до стікання атомів *Te* на дислокації, а отже, повинен спричиняти зростання концентрації вакансій *Te*. Натомість високотемпературний відпал приводить до міграції атомів *Te*, захоплених дислокаціями, у вакантні вузли, понижуючи таким чином концентрацію вакансій *Te*. Отже, можна було очікувати, що тривалим низькотемпературним відпалом легованих *Gd* зразків можна перевести певну частину іонів домішки в ЕПР активний стан Gd^{3+} , якщо вакансії *Te* є необхідною умовою появи такого стану, а наступним високотемпературним відпалом знову повернути їх в ЕПР неактивний стан Gd^{2+} .

Аналогічну низькотемпературному відпалу роль за умови справедливості запропонованого у [6] механізму виникнення зарядового стану Gd^{3+} у досліджуваних матеріалах повинно було би відігравати і розтирання кристалів у порошок. Загальновідомо, що пластична деформація кристалів приводить до значного зростання густини дислокацій у них. Як показали дослідження ядерного магнітного резонансу на ядрах ^{207}Pb кристалів *PbTe* і твердих розчинів на їх основі [13], у випадку граничних пластичних деформацій, які супроводжують розтирання монокристалічних зразків у порошок, таке зростання становить п'ять порядків величини – від $5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$ для монокристалічних зразків, вирощених з розплаву методом Бріджмена, до $5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ для порошоків. Гігантська концентрація дислокацій ініціює швидке стікання надстехіометричних атомів телуру в порошкоподібних зразках на ці дислокації, внаслідок чого різко зростає концентрація електрично активних точкових дефектів у них – вакансій *Te*. Таким чином, у підсумку розтирання зразків у порошок приводить до тих же наслідків стосовно зміни концентрації вакансій у підґратці халькогену, що і низькотемпературний відпал монокристалічних зразків, тільки це відбувається набагато швидше.

Оскільки низькотемпературний відпал є процесом повільним, то він вимагає тривалого часу для досягнення суттєвих змін, які могли би бути виявлені експериментально. У зв'язку із цим він проводився шляхом простої витримки зразків при кімнатній температурі. Розтерті у порошок зразки відпалювались при дещо вищій температурі (близько 473 К), щоб прискорити дифузійні процеси і скоротити тривалість експерименту. Високотемпературний відпал проводився у вакуумі при температурі 773 К. Він застосовувався тільки для кристалічних зразків. Порошкоподібні зразки в такий спосіб не відпалювались, щоб запобігти процесам спікання. Розтирання зразків у порошок проводилось у агатовій ступці при кімнатній температурі. Дослідження спектрів ЕПР проводилось при кімнатній температурі та температурі рідкого азоту. Чутливість ЕПР спектрометра, на якому проводились дослідження, була не гіршою за 10^{15} спінів на зразок.

Експериментальні результати та їх обговорення. Основний результат проведених експериментальних досліджень зводиться до наступного. Наявність домішки гадолінію не є достатньою умовою для того, щоб вона проявила себе у спектрах ЕПР легованих кристалів $Pb_{1-x}Sn_xTe$, навіть, коли її концентрація набагато перевищує чутливість методу. Іншими

словами, зарядовий стан Gd^{3+} не завжди є домінуючим станом домішки Gd в твердих розчинах $Pb_{1-x-y}Sn_xGd_yTe$. Це впливає з наступного. По-перше, ми не спостерігали жодного сигналу ЕПР у свіжовирощених зразках p -типу провідності ні при кімнатній, ні при азотній температурі, незважаючи на дуже високу концентрацію Gd у таких зразках, аж до $8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ (рис. 1), в той час як при розтиранні їх у порошок фіксувався дуже інтенсивний сигнал ЕПР. По-друге, ми спостерігали появу сигналу ЕПР іонів Gd внаслідок низькотемпературного відпалу кристалічних зразків p -типу провідності і різке зростання інтенсивності такого сигналу при аналогічному відпалі порошкоподібних зразків. По-третє, сигнал ЕПР можна було погасити високотемпературним відпалом зразків.

Відмінність сигналу ЕПР свіжовирощених кристалічних і порошкоподібних зразків не може бути пов'язана зі скін-ефектом, оскільки у кристалічних зразках сигнал ЕПР був повністю відсутнім. Для порошкоподібних зразків він був нестабільний. На окремих зразках сигнал ЕПР міг повністю зникнути упродовж кількох годин, на інших зменшував свою інтенсивність, залишаючись протягом тривалого часу досить суттєвим.

ЕПР неактивні у свіжовирощених зразках іони Gd "активізувалися" внаслідок їх тривалого низькотемпературного відпалу. На зразках, що відпалювалися при кімнатній температурі, сигнал ЕПР появлявся поступово, залежно від віддалі розташування зразка від ростового n - p -переходу, тобто від концентрації гадолінію. При цьому тип провідності кристала залишався незмінним. Сигнал ЕПР на прикладі одного із таких зразків після 9 місяців його відпалу при кімнатній температурі показаний на рис. 2, *a*. Він має форму однієї досить широкої лінії, положення якої близьке до положення центральної лінії тонкої структури спектра ЕПР іонів Gd^{3+} в кристалах $PbTe:Gd$.

На відміну від $PbTe:Gd$, у легованих кристалах досліджуваного твердого розчину, незважаючи на їх високу структурну досконалість, ми ніколи не спостерігали тонкої структури спектра ЕПР. Достовірно фіксувалася тільки одна порівняно розширена лінія, інтенсивність якої, проте, залежала від орієнтації магнітного поля в кристалі. При обертанні магнітного поля в площині (100), наприклад, інтенсивність лінії зростала до максимуму, коли кут між напрямком \vec{H} і віссю [100] становив приблизно $\pm(28-30^\circ)$. У випадку кристалів $PbTe:Gd$ це відповідає ситуації, коли всі лінії тонкої структури сходяться в одну [14]. Даний факт дозволяє припустити, що у досліджуваних кристалах тонка структура ЕПР теж існує, але бокові лінії настільки розмиті, що їх важко зафіксувати експериментально, принаймні при досліджуваних температурах. Велике розширення бокових ліній спектра ЕПР може бути пояснено неупорядкованістю твердого розчину, що є типовим для збагачених оловом складів $Pb_{1-x}Sn_xTe$, і, як результат, значним розкидом параметрів кристалічного поля для різних іонів Gd , який завжди спричиняє розмиття спектра.

Як видно із рис. 2, експериментальний спектр ЕПР тривалий час відпалених кристалів $Pb_{1-x-y}Sn_xGd_yTe$ ($x = 0,2$, $y = 0,01$) не є простим. Спроба представити його суперпозицією кількох простих спектрів засвідчила, що всі принципові особливості експериментального спектра дійсно можуть бути відтворені такою суперпозицією трьох простих спектрів лоренцової форми. При цьому положення 1-ї складової приблизно відповідає положенню центральної лінії тонкої структури іонів Gd^{3+} в $PbTe:Gd$, тому ми приписуємо її іону Gd^{3+} у вузлі підгратки металу. Друга лінія зсунута відносно першої у область слабких полів і її положення відповідає значенню g -фактора, близькому до 2. Ця лінія спостерігається не для всіх зразків при розкладанні їх експериментальних спектрів на прості складові. Останне

може вказувати на те, що вона зв'язана з якимись комплексами *Gd* технологічного походження. Подібна лінія у спектрах ЕПР *PbTe:Gd* спостерігалася раніше авторами [11] і пояснювалася наявністю в кристалах збагачених *Gd* включень, тобто також дефектами технологічного походження. До речі, при дослідженнях вирощеного зливку методом ЕЗМА ми спостерігали окремі, дуже малі включення, збагачені гадолінієм, з яких під впливом електронного променя збуджувалася катодолюмінесценція у видимій області спектра. Природа цих включень на разі залишається нез'ясованою. Не виключено, що саме вони є відповідальними за другу складову спектра ЕПР досліджуваних зразків. Необхідно зазначити, що ці дві лінії зберігають своє взаємне розташування і при розтиранні досліджуваних зразків у порошок, про що йтиметься нижче.

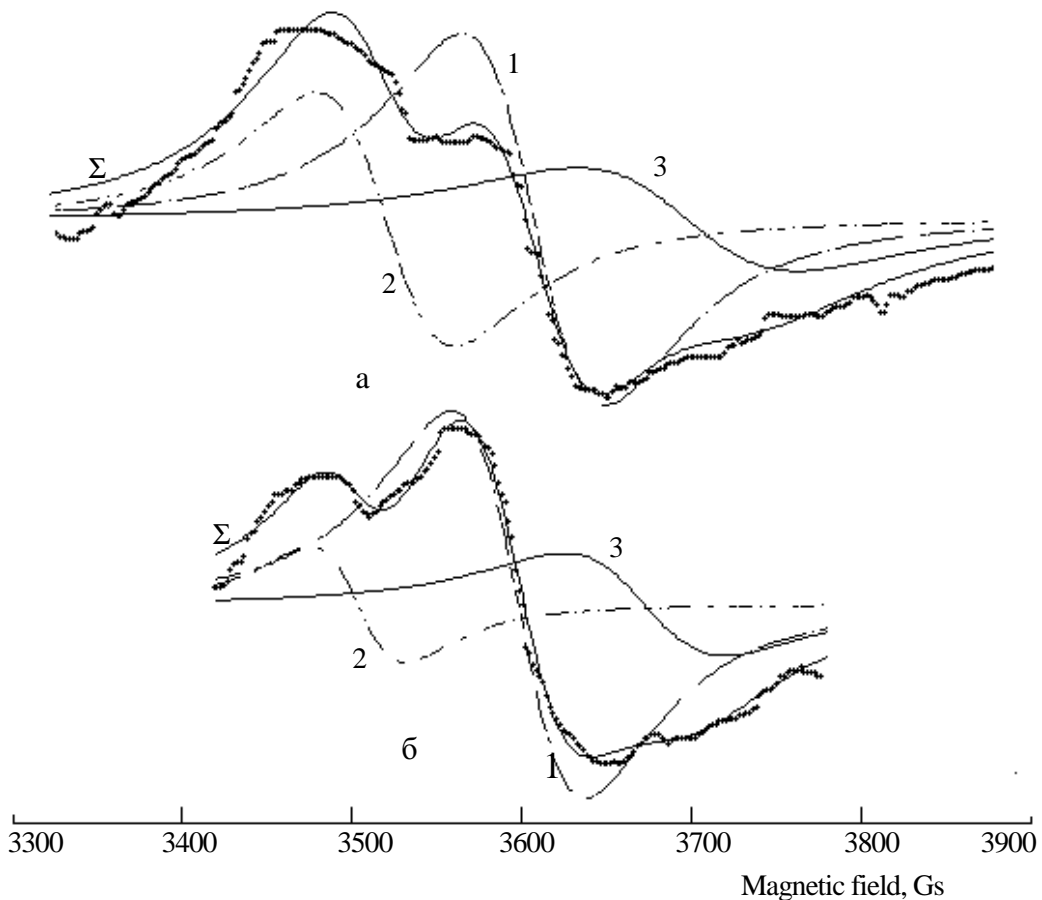


Рис. 2. Експериментальні спектри ЕПР зразків $p\text{-Pb}_{1-x-y}\text{Sn}_x\text{Gd}_y\text{Te}$ ($N_{Gd} \approx 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$) (темні точки) і їх симуляція простими спектрами (1–3 – лоренцові лінії, Σ – їх суперпозиція):
 а – зразок після дев'ятимісячного відпалу при кімнатній температурі;
 б – він же після додаткового високотемпературного відпалу протягом 1,5 год

Принципові особливості експериментальних спектрів ЕПР досліджуваних матеріалів не вдається відтворити, якщо до вузьких ліній не додати ще одну, значно ширшу лінію. Положення цієї третьої лінії відносно першої є не настільки однозначним, як положення другої лінії.

На рис. 2 показаний також спектр ЕПР приведеного в ЕПР чутливий стан тривалим низькотемпературним відпалом зразка після його додаткової високотемпературної обробки

протягом 1,5 годин у вакуумі. Як бачимо, навіть такий короткий відпал спричиняє як зменшення інтенсивності сигналу ЕПР, так і зміну його форми. При цьому параметри складових 2 і 3 спектра виявляються набагато чутливішими до відпалу, ніж параметри складової 1. Якщо зменшення амплітуди і ширини лінії 1-ї складової у результаті зазначеного відпалу нормувати на одиницю, то для 2-ї і 3-ї ліній це зменшення становитиме 2,9 і 1,4 та 1,4 і 1,3, відповідно. При збільшенні тривалості відпалу зразка до однієї доби його сигнал ЕПР практично зник.

Після однодобового відпалу, який звів практично до нуля кількість ЕПР активних центрів гадолінію у досліджуваному зразку, останній був розтертий у порошок. Таке розтирання, як і у випадку розтирання свіжовирощених кристалів, знову перевело значну частину іонів Gd у ЕПР активний стан, що проявилось у реєстрації досить інтенсивного сигналу ЕПР (рис. 3), який, як і сигнал вихідного зразка до високотемпературного відпалу, може бути відтворений суперпозицією трьох простих ліній лоренцевої форми – двох порівняно вузьких, положення яких практично збігається з положенням 1-ї та 2-ї складових сигналу кристалічного зразка, і третьої широкої, положення якої у порошкоподібному зразку загалом не збігається з положенням 3-ї складової сигналу ЕПР кристалічного зразка.

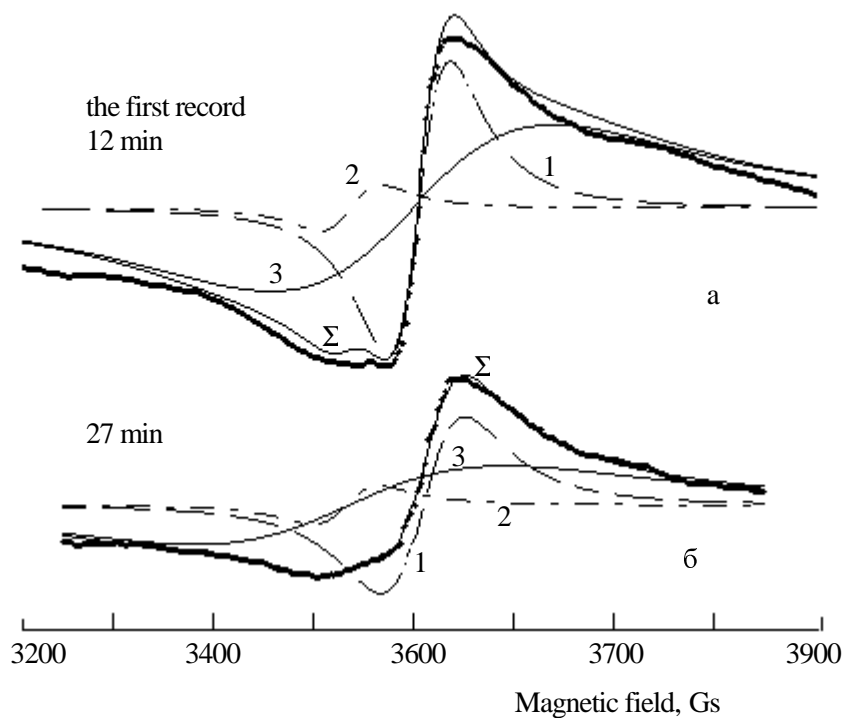


Рис. 3. Спектри ЕПР того ж, що на рис. 2, зразка, але розтертого у порошок після високотемпературного відпалу протягом 1 доби, записані через 12 і 27 хв після розтирання кристала. Смісл кривих 1–3 і Σ той же, що на рис. 2

Сигнал ЕПР такого порошкоподібного зразка виявився нестійким. Це ілюструють дані рис. 3, де наведені експериментальні спектри ЕПР, записані через різні проміжки часу після розтирання кристала в порошок, та їх моделювання за допомогою простих лоренцевих ліній. Добре видно, що з часом форма сигналу ЕПР змінюється, а його інтенсивність зменшується. Сам же експериментальний спектр ЕПР завжди міг бути задовільно апрокси-

мований суперпозицією трьох ліній лоренцового типу, перші дві з яких (вузькі) практично зберігають своє взаємне розташування, а положення третьої (широкої) лінії з часом змінюється (рис. 3).

На рис. 4 зображено спектри ЕПР ще одного порошкоподібного зразка, записані безпосередньо після приготування порошку та після його додаткового відпалу при 473 К протягом однієї доби. На цей раз порошкоподібні зразки, як і попередні, були приготовлені з відпаленої протягом дев'яти місяців при кімнатній температурі області зливу p -типу провідності, але віддаленої від ростового n - p -переходу, а отже, збідненої на гадоліній. Добре видно, що низькотемпературний відпал порошку дуже ефективно збільшує сигнал ЕПР. Характерною особливістю останнього для порошкоподібних зразків, виготовлених з означеної області кристалічного зливу, є те, що як до низькотемпературного відпалу порошків, так і після нього, сигнал ЕПР, по-перше, був достатньо стабільний в часі, а по-друге, задовільно відтворювався суперпозицією не трьох, як на рис. 3, а двох – вузької і широкої – лоренцових ліній, дуже слабкозміщених одна відносно іншої по магнітному полю. Додавка третьої лінії не приводила до принципового покращання відтворення експериментального спектра модельним.

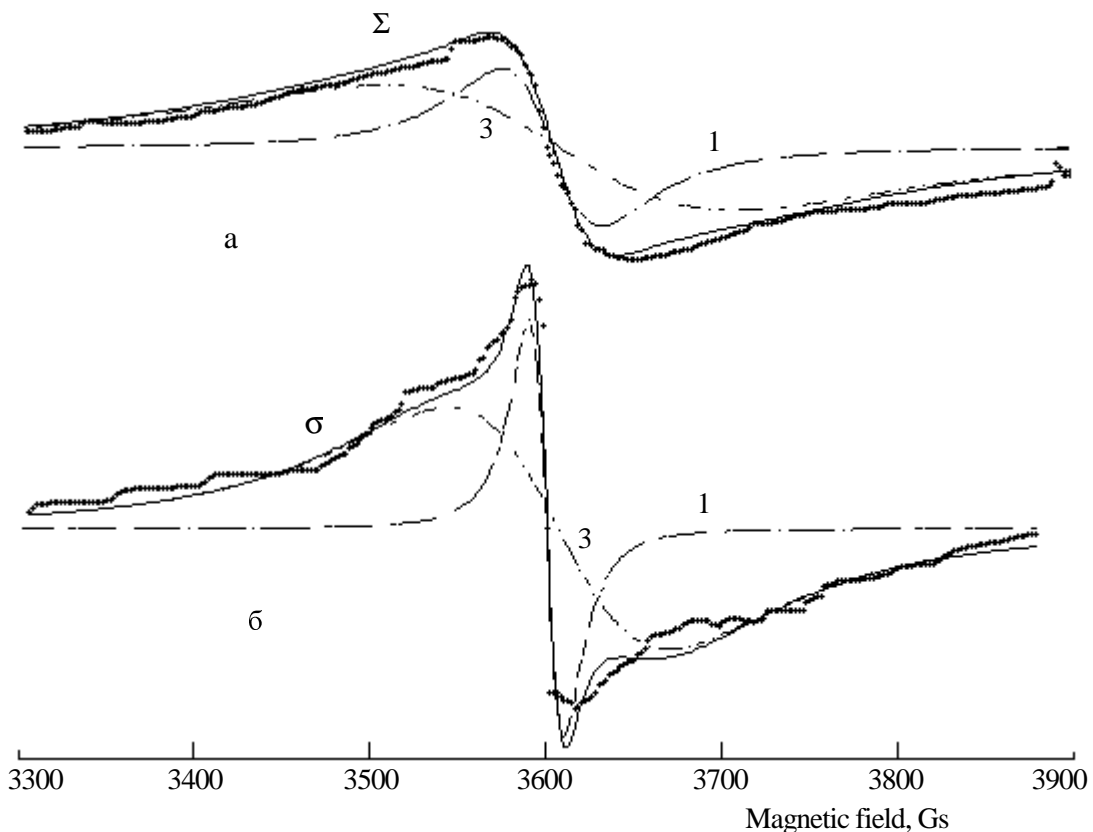


Рис. 4. Спектр ЕПР порошкоподібного зразка $p\text{-Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Gd}_y\text{Te}$ ($N_{\text{Gd}} < 10^{19} \text{ см}^{-3}$) до (а) і після (б) низькотемпературного відпалу порошку. Смісл кривих 1–3 і Σ той же, що на рис. 2

Ми вважаємо, що одержані експериментальні результати є вагомим підтвердженням запропонованої у [6] моделі виникнення ЕПР активного зарядового стану Gd^{3+} домішки гадолінію у легованих кристалах телуридів свинцю і олова. Найбільш вражаючими із них,

які служать на користь цієї моделі, є поява сигналу ЕПР у порошкоподібних зразках, приготуєваних із кристалічних p -типу провідності, у яких сигнал ЕПР відсутній повністю, значне зростання його інтенсивності при низькотемпературному відпалі порошоків і повне гасіння сигналу ЕПР високотемпературним відпалом зразків p -типу провідності. Підтвердження цими експериментальними результатами моделі, що розглядається, впливає з ідей і відомих літературних даних, наведених вище. Не повторюючи їх, акцентуємо увагу ще на деяких фактах, які можуть бути корисними для розуміння реальної ситуації і інтерпретації одержаних результатів. Загальновідомо, що розтирання кристалів у порошок на порядки збільшує густину дислокацій у зразках. Відповідно, згідно з результатами Скенлона [12], на порядки збільшується концентрація стоків для атомів Te при низькотемпературному відпалі, а отже, і різко зростає імовірність виникнення вакансій Te і їх комплексів з домішкою заміщення Gd . Ось чому низькотемпературний відпал порошоків є значно ефективнішим для ЕПР активації іонів домішки Gd в досліджуваних матеріалах відносно кристалічних зразків. По-друге, як показали вже перші дослідження кристалів телуридів свинцю і олова, вирощених із розплавів, що містять Gd [5], останній спричиняє різке покращення структурної досконалості і якості кінцевих ділянок зливків, що ростуть з таких розплавів, разом із зменшенням загальної концентрації Gd у цьому напрямку. Звідси впливає, що чим далі від ростового n - p -переходу в напрямку до кінця зливку знаходиться досліджуваний зразок, тим менша ймовірність виникнення різного роду мікровключень та інших складних комплексів, що містять Gd . Задовільне моделювання експериментальних спектрів ЕПР порошоків, приготуєваних із віддаленої від ростового n - p -переходу області зливку, двома простими – вузькою і широкою – лініями, і необхідність ще одної вузької лінії для моделювання спектрів зразків, близьких до n - p -переходу, може служити доказом того, ця додаткова лінія, про яку йшлося вище, дійсно має технологічне походження і пов'язана з якимись (поки що невідомої природи) складними комплексами на основі гадолінію.

Що ж до природи широкої лінії, зараз важко сказати що-небудь визначене. Можна хіба що висловити припущення, враховуючи значну ширину лінії, що вона зв'язана не з одиночними, а із взаємодіючими між собою Gd центрами, оскільки взаємодія, як відомо, приводить до розширення ліній спектрів ЕПР парамагнітних іонів.

На закінчення відзначимо, що на відміну від легуваних зразків p -типу провідності, в яких залежно від умов сигнал ЕПР іонів Gd міг спостерігатися або ні, у зразках n -типу провідності він спостерігався завжди як при азотній, так і при кімнатній температурах.

Висновки. Одержані результати експериментального вивчення спектрів ЕПР кристалічних і порошкоподібних зразків твердих розчинів p - $Pb_{1-x-y}Sn_yGd_yTe$ ($x = 0,2$, $y = 0,01$) і їх аналіз підтверджують правильність моделі виникнення зарядового стану домішки гадолінію Gd^{3+} у досліджуваних матеріалах, згідно з якою він є складовою частиною комплексу "домішка заміщення у вузлі металічної підґратки – вакансія у підґратці халькогену".

1. Мастеров В.Ф., Захаренков Л.Ф. // ФТП. – 1990. – 24. – С. 610–629.
2. Przybylinska H, Jantsch W, Suprun-Belevitch Yu, Stepikhova, M, Palmetshofer L, Hendorfer G, Kozanecki A, Wilson R J, Sealy B J. // Phys. Rev. B. – 1996. – 54. – P. 2532–2547.
3. Алексеева Г.Т., Ведерников М.В., Гурьева Е.А. та ін. // ФТП. – 1998. – 32. – С. 806–810.
4. Заячук Д.М., Иванчук Д.Д., Иванчук Р.Д., Микитюк В.И. // ФТП. – 1989. – 23. – С. 1654–1657.

5. Zayachuk D.M., Matulenis E.L., Mikityuk V.I. // *J. Cryst. Growth.* – 1992. – **121.** – P. 235–239.
6. Zayachuk D.M., Kempnyk V.I. Bednarsky W., Waplak S. // *JMMM.* – 1999. – **191.** – P. 207–210.
7. Заячук Д.М., Добрянский О.А. // *ФТП.* – 1998. – **32.** – С. 1331–1333.
8. Zayachuk D.M., Polyhach Ye.O., Mikityuk V.I., Baltrunas D. // *Phys. Stat. Sol.(b).* – 2001. – **225.** – P. 311–316.
9. Story T., Gorska M., Lusakowski A., Arciszewska M., Dobrowolski W., Grodzicka E., Golacki Z., Galazka R.R. // *Phys. Rev. Lett.* – 1996. – **77.** – P. 2041–2044.
10. Заячук Д.М., Шендеровський В.А. // *УФЖ.* – 1991. – **36.** – С. 1692–1713.
11. Bartkowski M., Northcott D.J., Park J.M., Reddoch A.H. // *Sol. St. Commun.* – 1986. – **56.** – P. 659–662.
12. Scanlon W.W. // *Phys. Rev.* – 1962. – **126.** – P. 509–514.
13. Летюченко С.Д., Слынько Е.И., Хандоожко А.Г., Копыл А.И. // *Тр. Всесоюз. Семинара "Примеси и дефекты в узкозонных полупроводниках".* – Павлодар, 1987. – С. 11–13.
14. Zayachuk D., Polyhach Ye., Slynko E., Khandozhko O., Rudowicz C. // *Physica B.* – 2002. *in print.*