

Н.В. Мартинюк<sup>1</sup>, О.А. Бурій<sup>1</sup>, С.Б. Убізський<sup>1</sup>,  
І.І. Сиворотка<sup>2</sup>, А. Бьоргер<sup>3</sup>, К.Д. Беккер<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра напівпровідникової електроніки;

<sup>2</sup> Інститут матеріалів, Науково-виробниче підприємство “Карат”;

<sup>3</sup> Технічний університет м. Брауншвейг, Німеччина

## ЗМІНА ЗАРЯДОВОГО СТАНУ ЙОНІВ ІТЕРБІЮ У СИЛЬНОАКТИВОВАНИХ КРИСТАЛАХ ТА ЕПІТАКСІЙНИХ ПЛІВКАХ $\text{Yb:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$

✉ Мартинюк Н.В., Бурій О.А., Убізський С.Б., Сиворотка І.І., Бьоргер А., Беккер К.Д., 2008

N.V. Martynuk, O.A. Buryu, S.B. Ubizskii, I.I. Syvorotka, A. Boerger, K.D. Becker

## RECHARGE PROCESSES OF YTERBIUM IONS IN HIGHLY DOPED $\text{Yb:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ SINGLE CRYSTALS AND EPITAXIAL FILMS

Ó Martynuk N.V., Buryu O.A., Ubizskii S.B., Syvorotka I.I., Boerger A., Becker K.D., 2008

Наведено результати вивчення впливу домішок на перезарядку йонів  $\text{Yb}^{3+} \leftarrow \text{Yb}^{2+}$  під час термохімічних обробок у кристалах  $\text{Yb:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  ( $\text{Yb:IAГ}$ ). Засобами оптичної спектроскопії та вимірюванням часу життя верхнього лазерного рівня досліджено монокристали  $\text{Yb:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ,  $\text{Yb}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  ( $\text{YbAG}$ ),  $\text{Ni:Yb}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ,  $\text{K:Yb}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ , вирощені за методом Чохральського, а також монокристалічні плівки  $\text{Yb:IAГ}$ , одержані методом рідинно-фазної епітаксії. Встановлено, що процес відновлення  $\text{Yb}^{3+} \leftarrow \text{Yb}^{2+}$  в  $\text{Yb:IAГ}$  може бути реверсивним або неревверсивним, залежно від наявності в кристалі легуючих або неконтрольованих домішок.

In this communication we report about our study on the influence of impurities on recharge processes  $\text{Yb}^{3+} \leftarrow \text{Yb}^{2+}$  under thermo-chemical treatments in  $\text{Yb:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  ( $\text{Yb:YAG}$ ) crystals and films. Single crystals of  $\text{Yb:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ,  $\text{Yb}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  ( $\text{YbAG}$ ),  $\text{Ni:Yb}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ,  $\text{K:Yb}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  grown by Czochralski- technique as well as single crystalline films of  $\text{Yb:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  grown by liquid phase epitaxy were investigated by means of fluorescence lifetime measurements and optical spectrometry. It was found, that the reduction process  $\text{Yb}^{3+} \leftarrow \text{Yb}^{2+}$  in  $\text{Yb:YAG}$  can be reversible or non-reversible depending on the presence of additional (doping or impurity) ions.

### Вступ

Сильноактивовані кристалічні матеріали  $\text{Yb:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  розглядаються як найперспективніші для активних середовищ дискових лазерів високої та середньої потужності з діодним збудженням, що генерують в околі 1 мкм, завдяки спроможності цих матеріалів до високого рівня активації йонами  $\text{Yb}^{3+}$  (аж до повного заміщення  $\text{Y}^{3+}$ ) без концентраційного гасіння люмінесценції. З іншого боку, процеси гасіння можуть відбуватися за рахунок передавання енергії збудження йонів  $\text{Yb}^{3+}$  до йонів неконтрольованих домішок та центрів забарвлення [1, 2], що призводить до скорочення часу життя верхнього лазерного рівня йона  $\text{Yb}^{3+}$  та модифікації кінетики люмінесценції. Як було встановлено у роботах [2, 3], ефективними центрами гасіння люмінесценції  $\text{Yb}^{3+}$  є, зокрема, йони  $\text{Yb}^{2+}$ , які формуються у кристалі під час вирощування. Іншим перспективним напрямком використання сильноактивованих матеріалів  $\text{Yb:IAГ}$  є реєстрація низькоенергетичних сонячних нейтри-

но, використовуючи люмінесценцію з перенесенням заряду в УФ та видимому діапазонах [4, 5]. Вивчення умов та закономірностей процесів перезарядки  $\text{Yb}^{2+} \leftrightarrow \text{Yb}^{3+}$  є важливим для обох напрямків застосування. Ця робота продовжує вивчення спектроскопічних особливостей епітаксійних плівок  $\text{Yb}:\text{IAГ}$  [6, 7], а також оптичні *in-situ* дослідження кінетик окиснення кристала  $\text{YbAG}$  [8], і спрямована на формування глибших уявлень про механізми процесів перезарядки  $\text{Yb}^{2+} \leftrightarrow \text{Yb}^{3+}$ .

### Методика досліджень

Дослідження виконували на монокристалах  $\text{Yb}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ,  $\text{Yb}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ,  $\text{Ni}:\text{Yb}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ,  $\text{K}:\text{Yb}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ , вирощених методом Чохральського (Cz) в Інституті лазерної фізики Гамбурзького університету (м. Гамбург, Німеччина), та монокристалічних плівок  $\text{Yb}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ , отриманих методом рідинно-фазної епітаксії (РФЕ) на підкладках  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  в Інституті матеріалів НВП “Карат” (м. Львів, Україна). Деякі характеристики досліджуваних зразків наведено в табл. 1 (склад зразків вказано за шихтою).

Досліджувані монокристали вирощено на ростовій установці фірми Leybold-Heraeus з ренієвого тигля в атмосфері суміші газів  $\text{N}_2:\text{H}_2 = 20:1$  за температури близько  $2050^\circ\text{C}$ , використовуючи вихідні матеріали високої чистоти (99,999 %).

Було вирощено дві серії зразків монокристалічних плівок ІАГ: легованих  $\text{Yb}$ ,  $\text{Ga}$  та легованих  $\text{Yb}$ ,  $\text{Sc}$ . Плівки обох серій були вирощені за стандартним методом ізотермічної рідинно-фазної епітаксії (РФЕ) [11] з переохолодженого розплаву гранат-утворюючих компонентів, розчинених у розчиннику на основі  $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{--B}_2\text{O}_3$ , на підкладці, що обертається в горизонтальній площині. Як підкладки використовували пластини чистого монокристалічного ІАГ орієнтації [111]. Вирощування відбувалось в атмосфері повітря в температурному інтервалі  $980\text{--}1020^\circ\text{C}$ . Товщини одержаних плівок були  $90\text{--}140$  мкм. Концентрацію  $\text{Yb}_2\text{O}_3$  в шихті вибирали так, щоб одержати концентрацію ітербію в плівках  $\text{Yb,Ga}:\text{IAГ}$  та  $\text{Yb,Sc}:\text{IAГ}$  на рівні відповідно 10 та 40 ат. %. Щоби підігнати параметр елементарної комірки плівок до параметра елементарної комірки підкладки ІАГ ( $12,0082 \text{ \AA}$ ), в розплав додавали, відповідно,  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  та  $\text{Sc}_2\text{O}_3$ . Під час вирощування плівок першого типу в розплав додавали  $\text{CaO}$  з метою запобігання утворення іонів  $\text{Yb}^{2+}$  для компенсації чотиривалентних неконтрольованих домішок, які могли потрапити в розплав із платинового тигля. Розплав для вирощування плівок другого типу містив  $\text{SiO}_2$  для формування іонів  $\text{Yb}^{2+}$ , а також  $\text{MgO}$  для їх часткової компенсації. Молярне співвідношення  $\text{MgO}/\text{SiO}_2$  в розплаві змінювалось в межах  $0\text{--}1,25$  у серії.

Оскільки йони  $\text{Yb}^{2+}$  у кристалі ІАГ спричиняють характерні смуги оптичного поглинання у видимій області [2, 9] та спричиняють скорочення часу життя верхнього лазерного рівня йонів  $\text{Yb}^{3+}$  [2, 3, 10], то для дослідження процесів перезарядки йонів ітербію в кристалах  $\text{Yb}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ , в яких наявні йони ітербію обох валентностей, використано методи оптичної спектроскопії та визначення часу життя верхнього лазерного рівня йонів  $\text{Yb}^{3+}$ .

Спектри оптичного поглинання зразків досліджено за кімнатної температури у діапазоні від  $200$  до  $1100$  нм на спектрофотометрах Lambda 900 (Perkin Elmer) та CARY 5000 (Varian).

Для визначення часу життя верхнього лазерного рівня йона  $\text{Yb}^{3+}$  у досліджуваних зразках реєструвалася кінетика люмінесценції на довжині хвилі  $1030$  нм при збудженні за допомогою оптичного парамагнітного осцилятора (ОПО) на  $968$  нм. Люмінесцентне випромінювання фокусувалось на вхідній щілині монохроматора SPEX, сигнал від якого реєструвався фотопомножувачем з характеристикою типу S1 та після підсилення відображався на осцилографі Lecroy 9360. Ураховуючи статистичний характер процесу випромінювання люмінесценції, автоматично усереднювались  $600\text{--}700$  сигналів, внаслідок чого одержувалась часова залежність загасання люмінесценції (кінетика люмінесценції), яку можна опрацювати за допомогою програм ПК.

## Експериментальні результати та їх обговорення

**Формування іонів  $\text{Yb}^{2+}$  під час процесу вирощування.** Всі свіжовирощені кристали  $\text{Yb:IAГ}$ , а також  $\text{Ni:YbAG}$ ,  $\text{K:YbAG}$  мали блакитне забарвлення та їхні спектри оптичного поглинання у видимій області подібні. Наприклад, на рис. 1 показано спектр оптичного поглинання свіжовирощеного  $\text{Ni:YbAG}$  при кімнатній температурі, де окрім поглинання на 890–1040 нм, що відповідає f-f електронним переходам йона  $\text{Yb}^{3+}$ , є ще три широкі смуги в УФ та видимій області. Вони характерні для йона  $\text{Yb}^{2+}$  і відповідають 4f-5d електронним переходам [2, 9]. Таке зниження зарядового стану можливе завдяки відновлювальній атмосфері вирощування і може супроводжуватися формуванням центрів забарвлення для зарядової компенсації, наприклад,  $(\text{Yb}^{2+}\text{-F}^+)$ - центрів [2, 13].

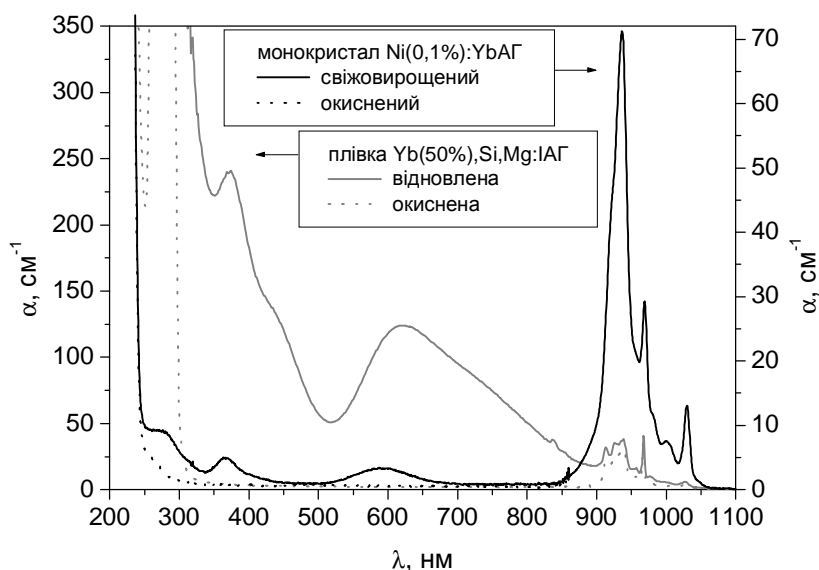


Рис. 1. Спектри оптичного поглинання кристала  $\text{CNi}$  та однієї з епітаксійних плівок серії F3 ( $T=300\text{ K}$ )

Аналізуючи формування  $\text{Yb}^{2+}$  в епітаксійних плівках, варто зауважити, що всі вони були вирощені в окиснювальній атмосфері, проте склад шихти був різним. На спектрах плівок з серії F3 не було характерних для йона  $\text{Yb}^{2+}$  смуг поглинання, незважаючи на присутність у шихті цієї серії йонів  $\text{Si}^{4+}$ .

У плівці F2 йони  $\text{Yb}^{2+}$  не були сформовані, ймовірно завдяки зарядовій компенсації чотири-валентних неконтрольованих домішок, які потрапляють у шихту під час росту, йонами  $\text{Ca}^{2+}$ . Слабко інтенсивні смуги поглинання  $\text{Yb}^{2+}$  спостерігались лише на спектрах плівки F1 (детально спектри обох плівок F1 та F2 розглядаються в [12]). Відсутність чи наявність  $\text{Yb}^{2+}$  в цих матеріалах також проявляється на часах життя лазерного рівня активних йонів  $\text{Yb}^{3+}$  (див. табл. 1), а саме: часи життя лазерного рівня в плівці F2 до і після окиснення майже однакові (відповідно, 665 та 700 мкс), тоді як час життя в плівці F1 істотно збільшується після окиснення (від 270 до 808 мкс).

Отже, на утворення йонів  $\text{Yb}^{2+}$  замість  $\text{Yb}^{3+}$  в IAГ під час вирощування істотно впливають домішкові йони, а також умови вирощування.

Зауважимо, що спектральні позиції максимумів смуг поглинання йонів  $\text{Yb}^{2+}$  у кристалах та плівках дещо відрізняються (рис. 1), де крім спектрів поглинання кристала  $\text{CNi}$ , для порівняння подано спектри однієї з епітаксійних плівок серії F3. На спектрах кристалів спостерігаються три смуги біля 275 нм ( $36363\text{ cm}^{-1}$ ), 400 нм ( $25000\text{ cm}^{-1}$ ) та 660 нм ( $15150\text{ cm}^{-1}$ ). А на спектрах епітаксійних плівок можна спостерігати дві смуги з піками біля 375 нм ( $26666\text{ cm}^{-1}$ ) та 625 нм ( $16000\text{ cm}^{-1}$ ). Третю смугу в УФ діапазоні ми не можемо побачити через те, що вона попадає в

сильну смугу поглинання на 250–305 нм, яка характерна для всіх наших плівок і яку приписують йонам  $\text{Bi}^{3+}$  [6]. Відмінність у положеннях максимумів поглинання  $\text{Yb}^{2+}$  у різних матеріалах пояснюють їх сильною залежністю від параметра елементарної комірки [14]. Відмінність є також і у відносних інтенсивностях смуг поглинання йонів  $\text{Yb}^{2+}$  та  $\text{Yb}^{3+}$ . Зокрема, в плівці інтенсивність смуг поглинання  $\text{Yb}^{2+}$  у кілька разів більша за інтенсивність смуг поглинання  $\text{Yb}^{3+}$  і на порядок більша за інтенсивність поглинання  $\text{Yb}^{2+}$  в кристалі, де поглинання  $\text{Yb}^{3+}$  набагато інтенсивніше за поглинання  $\text{Yb}^{2+}$ . Таке співвідношення інтенсивностей поглинання може свідчити про те, що частка йонів ітербію в двовалентному стані, які сформувалися в плівці, є набагато більшою, ніж у кристалі.

Таблиця 1

Деякі характеристики досліджуваних зразків

Позначення зразка	Склад (ат.%)	Метод, умови вирощування	Товщина, мкм	Час життя $\text{Yb}^{3+}$ , мкс свіжовир./окиснен	Поглинання $\text{Yb}^{2+}$ у свіжовир. зразку	Поглинання $\text{Yb}^{2+}$ після циклу окиснен./відновл.
<b>C20</b>	<b><math>\text{Yb(20):Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}</math></b>	Cz, $\text{N}_2/\text{H}_2$	494	918 / 1072	+	–
<b>C40</b>	<b><math>\text{Yb(40):Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}</math></b>	Cz, $\text{N}_2/\text{H}_2$	416	241 / 1142	+	–
<b>C60</b>	<b><math>\text{Yb(60):Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}</math></b>	Cz, $\text{N}_2/\text{H}_2$	494	44 / 1108	+	–
<b>C80</b>	<b><math>\text{Yb(80):Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}</math></b>	Cz, $\text{N}_2/\text{H}_2$	790	11 / 1021	+	–/+
<b>C100</b>	<b><math>\text{Yb}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}</math></b>	Cz, $\text{N}_2/\text{H}_2$	370	17 / 983	+	–
<b>CNi</b>	<b><math>\text{Ni(0,1):Yb}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}</math></b>	Cz, $\text{N}_2/\text{H}_2$	500	6 / 284	+	+
<b>СК</b>	<b><math>\text{K(0,5):Yb}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}</math></b>	Cz, $\text{N}_2/\text{H}_2$	455	7 / 500	+	+
<b>F1</b>	<b><math>\text{Yb(10),Ga:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}</math> (<math>\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3 = 0,0418</math>)</b>	РФЕ, повітря	16	270 / 808	+	–
<b>F2</b>	<b><math>\text{Yb(10),Ga,Ca:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}</math> (<math>\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3 = 0,104</math> <math>\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3 = 0,004</math>)</b>	РФЕ, повітря	38	665 / 700	–	–
<b>F3</b> (серія)	<b><math>\text{Yb(40),Si,Mg,Sc:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}</math> (<math>\text{MgO}/\text{SiO}_2 = 0-1,25</math>)</b>	РФЕ, повітря	90–140	-	–	+

**Процес перезарядки  $\text{Yb}^{2+} \rightleftharpoons \text{Yb}^{3+}$  при окисненні.** Як було показано у [3], процес перезарядки  $\text{Yb}^{2+} \rightarrow \text{Yb}^{3+}$  в  $\text{Yb:IAГ}$  починається при температурі 800 °С. Ми відпалили всі досліджувані зразки, в яких було утворено йони  $\text{Yb}^{2+}$ , в окиснювальній атмосфері, а саме: кристали C20, C60, CNi, СК у повітрі при 1050 °С протягом 24 год; плівку F1 в  $\text{O}_2$  при 900 °С протягом 12 год. У результаті всі зразки стали безбарвними і прозорими у видимій області спектра, незалежно від легування та умов вирощування. Відповідно, після усунення йонів  $\text{Yb}^{2+}$  – центрів гасіння люмінесценції  $\text{Yb}^{3+}$  – значення часу життя лазерного рівня  $\text{Yb}^{3+}$  у відпалених зразках зросли в кілька разів, порівняно зі свіжовирощеними зразками (див. табл. 1). Отже, процес окиснення  $\text{Yb}^{2+} \rightarrow \text{Yb}^{3+}$  в  $\text{Yb:IAГ}$  відбувається під час відпалу в окиснювальній атмосфері (зокрема у повітрі) за температур  $t \geq 800$  °С, незалежно від умов вирощування та додаткового легування матеріалу.

**Процес перезарядки  $\text{Yb}^{3+} \rightleftharpoons \text{Yb}^{2+}$  при відновленні.** Для дослідження умов формування йонів  $\text{Yb}^{2+}$  під впливом термо-хімічних оброблень, ми відпалили попередньо окиснені кристали у відновлювальній атмосфері кількома етапами:

- 1) у  $\text{Ar}/\text{H}_2$  за 900°С протягом 2 або 6 год. (всі зразки);
- 2) у  $\text{Ar}/\text{H}_2$  за 1050°С протягом 24 год. (зразки СК і CNi);
- 3) у  $\text{Ar}/\text{H}_2$  за 1200 °С протягом 15 год (всі зразки);
- 4) у вакуумі з додаванням металічного титану за 1200 °С протягом 10 год (зразки CNi, C40, C60, C80 та C100).

Після кожного етапу відпалу вимірювались спектри оптичного поглинання зразків при кімнатній температурі, що давало нам інформацію про наявність у них йонів  $\text{Yb}^{2+}$ .

У кристалах, легованих металами, – це зразки CNi та СК – процес перезарядки  $\text{Yb}^{3+} \rightarrow \text{Yb}^{2+}$  починався за температури  $900^\circ\text{C}$ , досягаючи значення коефіцієнта поглинання, як у свіжовирощених зразках, після відпалу в  $\text{Ar}/\text{H}_2$  при  $1200^\circ\text{C}$  (етап 3). Це добре зрозуміло з рис. 2, на якому подано спектри оптичного поглинання СК.

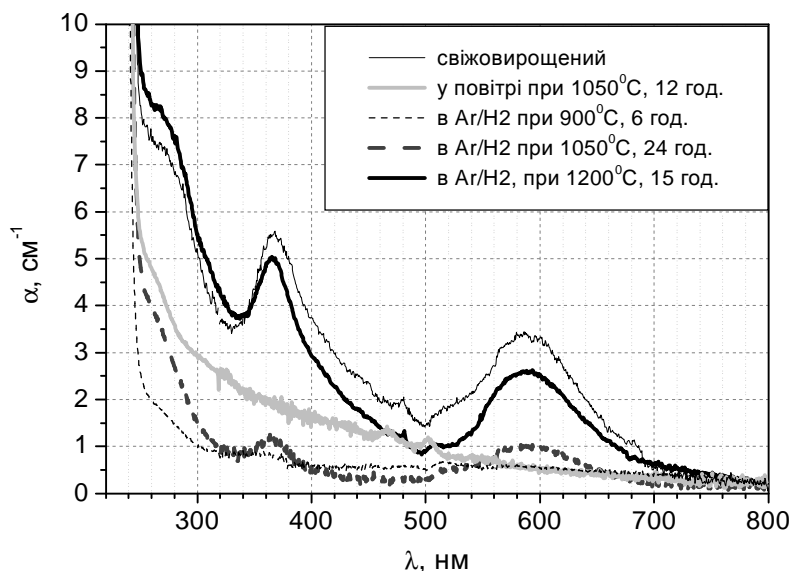


Рис. 2. Спектри оптичного поглинання після високотемпературних відпалів кристала СК ( $T=300\text{ K}$ )

Інакша ситуація спостерігалась на номінально чистих кристалах  $\text{Yb}:\text{LAG}$  без додаткового легування: формування йонів  $\text{Yb}^{2+}$  у зразках С40, С60, С100 після етапів відновлення 1–4 та у зразку С20 після етапів 1–3 не відбувалося. Єдиний кристал, у якого з'явилися смуги поглинання  $\text{Yb}^{2+}$ , – це С80, спектри якого показано на рис. 3. На нашу думку, процес перезарядки  $\text{Yb}^{3+} \rightarrow \text{Yb}^{2+}$  у цьому зразку відбувається за участю неконтрольованих домішок і/або дефектів наявних у ньому. Таке припущення ґрунтується на такому: кінетика люмінесценції  $\text{Yb}^{3+}$  окисненого С80 не описується задовільно однією експонентою, на відміну від інших окиснених зразків  $\text{Yb}:\text{LAG}$ , що однозначно свідчить про наявність центрів гасіння люмінесценції [1–3]. Для порівняння на рис. 4 показано кінетики люмінесценції  $\text{Yb}^{3+}$  зразків С80 і С20 у напівлогарифмічному масштабі, де експонентні кінетики є прямими.

Окремий додатковий експеримент був виконаний на кристалі С100, а саме: за умов 1, 3, 4 були відпалені два зразки цього кристала, один з яких був свіжовирощений, а другий попередньо окиснений. Спектри обох зразків після високотемпературних відпалів показано на рис. 5, а, б, з яких зрозуміло, що у свіжовирощеному зразку значна кількість йонів  $\text{Yb}^{2+}$  утворилася після відпалу у вакуумі з титаном, тоді як в окисненому зразку перезарядка йонів ітербію не відбулася. Це свідчить про те, що під час окиснення свіжовирощеного кристала відбуваються певні незворотні процеси, після яких повернення кристала у вихідний стан є неможливим. Отже, розглядаючи процеси перезарядки йонів ітербію, можна говорити про їх нереверсивність за певних умов. Беручи до уваги, що зразки CNi та СК вирощувались у тих самих умовах, що і всі зразки С20–С100, робимо висновок, що реверсивність або нереверсивність процесу відновлення  $\text{Yb}^{3+} \rightarrow \text{Yb}^{2+}$  залежить від наявності домішок (неконтрольованих або спеціально уведених).

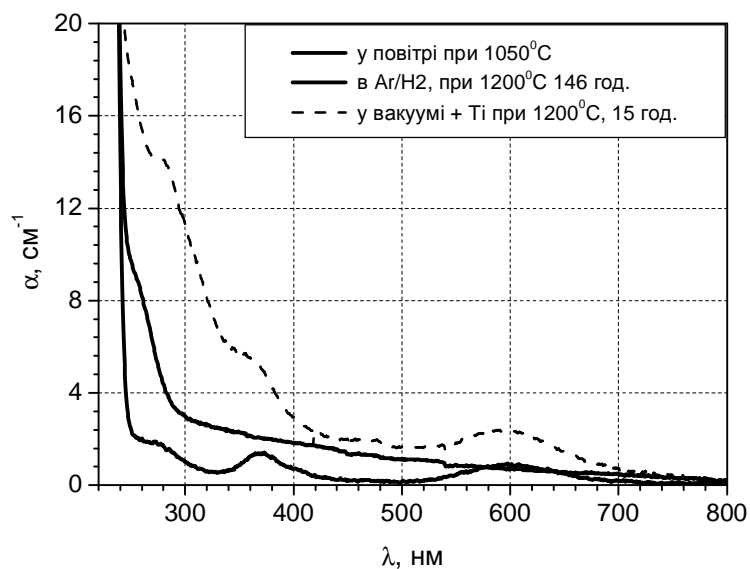


Рис. 3. Спектри оптичного поглинання кристала C80 після високотемпературних відпалів ( $T=300\text{ K}$ )

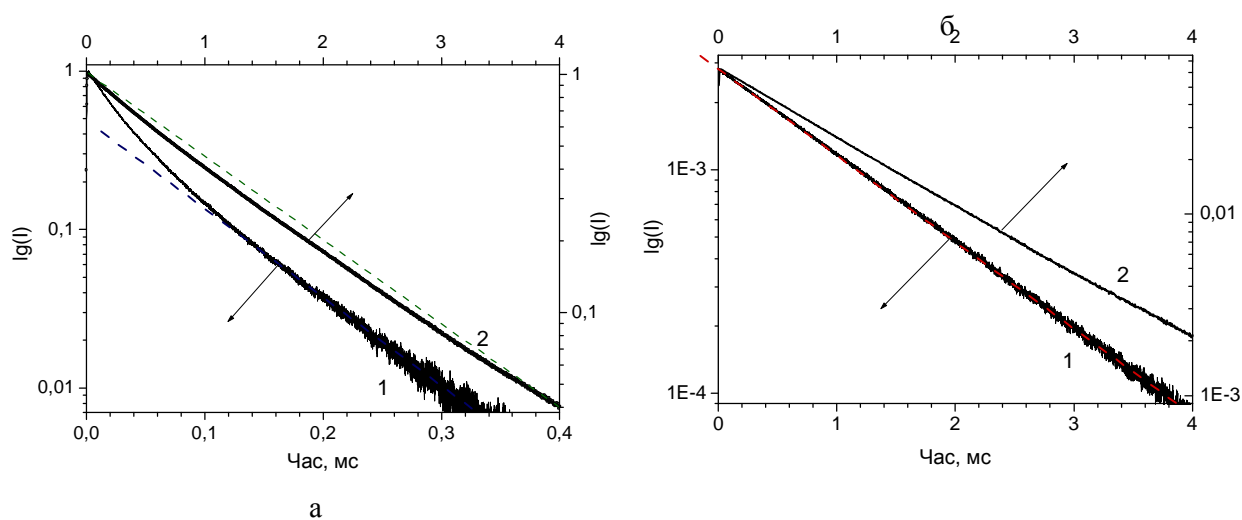


Рис. 4. Кінетики люмінесценції йона  $\text{Yb}^{3+}$  ( $\lambda=1030\text{ нм}$ ) у свіжовирощених та відпалених на повітрі кристалах:  
а – C80; б – C20;

1 – у свіжовирощеному кристалі; 2 – в окисненому кристалі

До такого самого висновку дійшли, досліджуючи півки. Зокрема, попередньо окиснені півки ми відпалювали у  $\text{Ar}/\text{H}_2$  при  $900$  та  $975\text{ }^\circ\text{C}$ . У результаті, процес перезарядки  $\text{Yb}^{3+} \rightarrow \text{Yb}^{2+}$  відбувся в усіх півках серії F3, додатково легованих як двовалентними ( $\text{Mg}^{2+}$ ), так і чотиривалентними йонами ( $\text{Si}^{4+}$ ). На рис. 1 зображено спектри поглинання однієї з епітаксійних півок цієї серії після високотемпературних відпалів. Тоді як у півці F2, легованій лише двовалентними ( $\text{Ca}^{2+}$ ) йонами, а також у номінально чистій півці F1, повторне відновлення не відбулося.

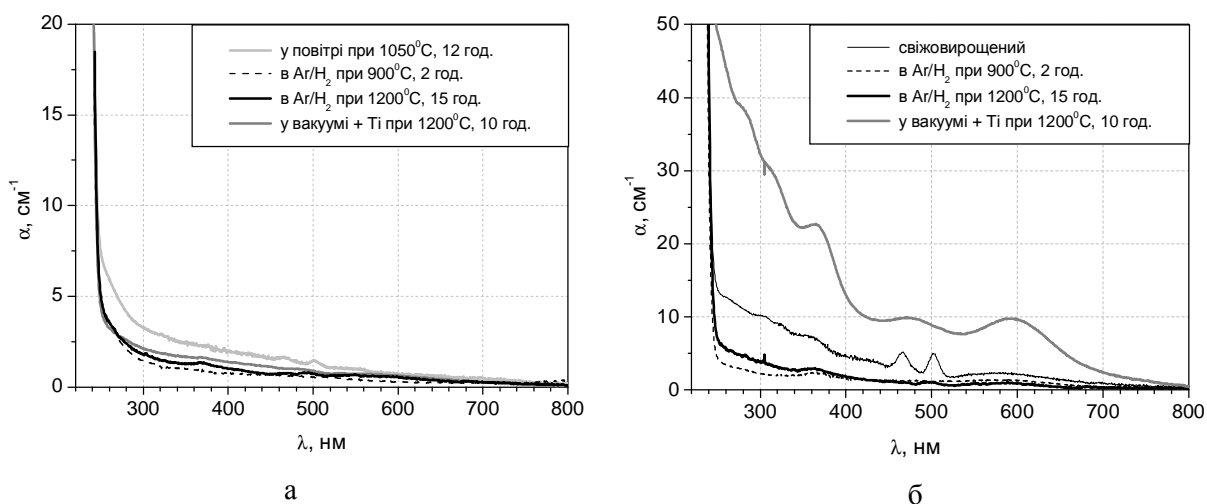


Рис. 5. Спектри оптичного поглинання кристала C100: а) спочатку окисненого, потім віддаленого у відновлювальних умовах; б) свіжовирощеного, потім віддаленого у відновлювальних умовах ( $T=300\text{ K}$ )

### Висновки

Досліджено процеси перезарядки  $\text{Yb}^{3+} \leftrightarrow \text{Yb}^{2+}$  у сильноактивованих кристалічних матеріалах  $\text{Yb}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  – монокристалах та епітаксійних плівках. Установлено, що процес окиснення  $\text{Yb}^{2+} \rightarrow \text{Yb}^{3+}$  в  $\text{Yb}:\text{IAГ}$  в атмосфері повітря починається при температурі  $800\text{ }^\circ\text{C}$  і відбувається, незалежно від умов вирощування та додаткового легування матеріала. На зниження зарядового стану йонів ітербію до  $\text{Yb}^{2+}$  в  $\text{Yb}:\text{IAГ}$  під час вирощування впливають як умови вирощування, так і наявність домішок (неконтрольованих або спеціально введених). Процес відновлення  $\text{Yb}^{3+} \rightarrow \text{Yb}^{2+}$  в  $\text{Yb}:\text{IAГ}$  може бути реверсивним або нереверсивним, залежно від наявності в матеріалі домішкових (неконтрольованих або спеціально введених) йонів. Повторне відновлення  $\text{Yb}^{3+} \rightarrow \text{Yb}^{2+}$  в окиснених матеріалах, номінально чистих та легуваних три- або двовалентними йонами, не відбувається.

**Робота виконана в межах держбюджетної теми “Сегнет” Міністерства освіти і науки України та проекту двостороннього українсько-німецького науково-технічного співробітництва ДК-М/53-2008.**

1. Falgun D. Patel, Eric C. Honea, Joel Speth et al // *IEEE J. of Quant. Electron.* – 2001. – 37(1). – P. 135-144.
2. Peizhi Yang, Peizhen Deng, Zhiwen Yin. *J. Lumin.* – 2002 – 97. – P. 51-54.
3. Fagundes-Peters D., Martynyuk N., Lünstedt K. et al // *J. Lumin.* – 2007. – 125. – P. 238-247.
4. Guerassimova N., Garnier N., Dujardin C., Petrosyan A.G., Pedrini C. *Chem. Phys. letters.* – 2001. – 339. – P. 197-202.
5. Guerassimova N., Garnier N., Dujardin C., Petrosyan A.G., Pedrini C. *J. of Lum.* – 2001. – 94-95. – P. 11-14.
6. Ubizskii S.B., Matkovskii A.O., Melnyk S.S. et al. *Phys. stat. sol. (a).* – 2004. – 201. – P. 791-797.
7. Martynyuk N.V., Ubizskii S.B., Buryy O.A., Becker K.D., Kreye M. *Phys. stat. sol. (c).* – 2005. – 2(1). – P. 330-333.
8. Kreye M., Becker K.D. *Phys. Chem. Chem. Phys.* – 2003. – 5. – P. 2283-2287.
9. Henke M., Persson J. and Kück S. *J. Lumin.* – 2000. – 87-89. – P. 1049-1051.
10. Sumida D.S., Fan T.Y. *Opt. Lett.* – 1994. – 19. – P. 1343-1345.
11. Robertson J.M. *J. Crystal Growth.* – 1978. – 45. – P. 233-242.
12. Zakharko Ya.M., Luchechko A.P., Ubizskii S.B., Syvorotka I.I., Martynyuk N.V., Syvorotka I.M. *Rad. Measurements.* – 2007. – 42. – P. 843-846.
13. Hongbing Yin, Deng Peizhen. *J. Appl. Phys.* – 1998. – 83(7). – P. 96-99.
14. Butajeva T.I., Petrosian A.G., Petrosian A.K. *Неорганические материалы.* – 1988. – 24. – P. 430-437.