

С.І. Ющук, С.О. Юр'єв, В.І. Бондар, В.Й. Ніколайчук *, С.Б.Харамбура

Національний університет "Львівська політехніка", кафедра фізики,

*Український державний технічний університет водного господарства і природозбереження

ОПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ФЕРОГРАНАТОВИХ ЕПТАКСІЙНИХ СТРУКТУР

© Ющук С.І., Юр'єв С.О., Бондар В.І., Ніколайчук В.Й., Харамбура С.Б., 2004

Ющук С.І., Юр'єв С.О., Бондар В.І., Ніколайчук В.Й. *, Харамбура С.Б.

ОПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ФЕРОГРАНАТОВИХ ЕПТАКСІЙНИХ СТРУКТУР

© Ющук С.І., Юр'єв С.О., Бондар В.І., Ніколайчук В.Й., Харамбура С.Б., 2004

Досліджено оптичні спектри пропускання епітаксійних структур залізо-ітрієвого та залізо-галій-ітрієвого гранатів. Отримано залежності коефіцієнтів поглинання від довжини світлової хвилі у видимій і близькій інфрачервоній областях. На основі аналізу і обробки інтерференційних картин розраховано показники заломлення ферогранатових плівок і підкладок з галій-гадолінієвого гранату в широкому інтервалі довжин хвиль та товщини плівок.

Досліджено оптичні спектри пропускання епітаксійних структур залізо-ітрієвого та залізо-галій-ітрієвого гранатів. Отримано залежності коефіцієнтів поглинання від довжини світлової хвилі у видимій і близькій інфрачервоній областях. На основі аналізу і обробки інтерференційних картин розраховано показники заломлення ферогранатових плівок і підкладок з галій-гадолінієвого гранату в широкому інтервалі довжин хвиль та товщини плівок.

Вступ

Удосконалення технології синтезу монокристалів і монокристалічних плівок ферогранатів та дослідження їх оптичних властивостей показали, що серед них є прозорі як в інфрачервоній, так і у видимій областях спектра. Виявилось, що деякі з цих прозорих магнетиків володіють достатньо високими рівнями магнітооптичних ефектів [1], що висунуло ці матеріали в перспективні для створення магнітооптичних мікроелектронних пристроїв [2]. Для успішного використання ферогранатових плівок в оптоелектроніці і оптичних сенсорних пристроях треба контролювати такі їх параметри, як товщини, коефіцієнти заломлення світла, оптичні пропускні і поглинальні здатності в широкому інтервалі довжин хвиль.

Експеримент

Для вимірювання товщини і показника заломлення ферогранатових плівок найчастіше використовується оптичний інтерференційний метод. Інтерференційна картина утворюється під час вимірювання спектрів пропускання під час падіння світлового променя на зразок у напрямі, близькому до нормалі. У роботі спектри пропускання ферогранатових епітаксійних структур (плівка на підкладці) отримували за допомогою спектрофотометрів Specord M-40 і Specord 751R. Причому, для плівок товщиною ≤ 4 мкм вимірювання виконувались у видимій і близькій інфрачервоній (ІЧ) областях на спектрофотометрі Specord M-40, а для плівок товщиною ≥ 4 мкм – в середній ІЧ області на спектрофотометрі Specord 751R. З рис. 1 видно, що оптичні параметри можна визначити тільки в області прозорості підкладок, тобто при $\lambda < 7$ мкм. Похибка вимірювань становила 0.1 % при визначенні показників заломлення і 2 % при визначенні товщини.

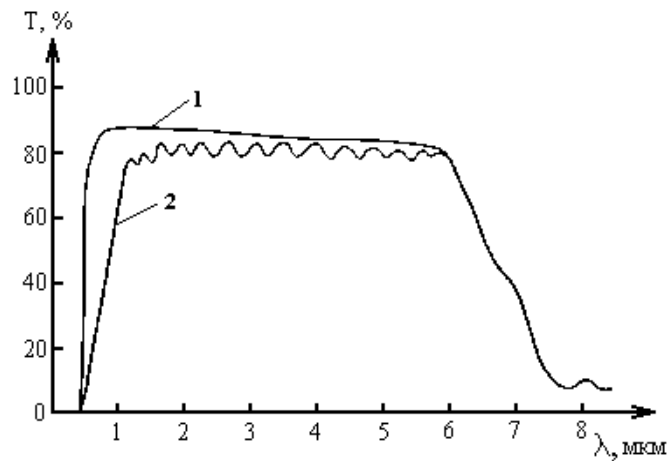


Рис. 1. Спектри пропускання світла: 1 – підкладки з ГГГ; 2 – плівки ЗІГ

Для досліджень були вирощені монокристалічні плівки залізо-ітрієвого гранату (ЗІГ) $Y_3Fe_5O_{12}$ і заміщеного галієм ЗІГ $Y_3Fe_{5-x}Ga_xO_{12}$ ($x=0.1; 0.3; 0.5$). Ферогранатові плівки вирощували методом ізотермічної рідкіснофазної епітаксії на підкладках з галій гадолінієвого гранату (ГГГ) $Gd_3Ga_5O_{12}$ орієнтації (111) з розплавів гранатуутворюючих оксидів Y_2O_3 , Fe_2O_3 , Ga_2O_3 і розчинника $PbO-B_2O_3$. Товщина плівок не перевищувала 10 мкм, а товщина підкладок становила 0.5 мм. Для епітаксійного вирощування використовували автоматизовану установку, в якій технологічними операціями керував комп'ютер. Точність підтримування температури в зонах печі становила ± 0.1 К.

Теоретична модель

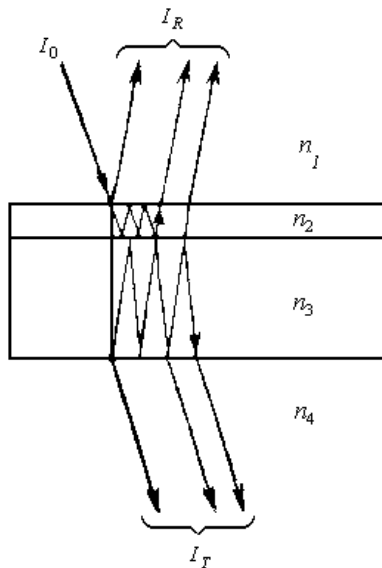


Рис. 2. Схематичний розріз системи плівка – підкладка і хід променів у ній

На рис. 2 показано схематичний розріз системи плівка–підкладка і хід променів у ній. Позначимо показники заломлення плівки і підкладки відповідно через n_2 і n_3 . За обмежувальні середовища приймемо повітря з показниками заломлення $n_1 = n_4 = 1$. Для визначення показників заломлення підкладки і плівки необхідно виміряти спектральні залежності коефіцієнтів пропускання T_0 чистої підкладки і T -системи плівка - підкладка.

Розглянемо випадок, коли на прозору підкладку нанесена слабо поглинаюча плівка. Коефіцієнт пропускання T_0 чистої підкладки за умови, що товщина підкладки набагато більша від довжини хвилі ($h_3 \gg \lambda$), виражається формулою [3]

$$T_0 = \frac{2n_3}{n_3^2 - 1}. \quad (1)$$

З цієї формули розраховується показник заломлення підкладки n_3 .

Коефіцієнт пропускання T системи тонка слабо поглинаюча плівка–підкладка задається виразом

$$T = \frac{T_{31} \cdot T_{34}}{1 - R_{31} \cdot R_{34}}, \quad (2)$$

де T_{31} і R_{31} — коефіцієнти пропускання і відбивання тонкого шару (плівки) при падінні світла на цей шар з підкладки. Ці коефіцієнти виражаються досить складними співвідношеннями [3]. T_{34} і R_{34} — френелівські коефіцієнти, відповідно, пропускання підкладки і відбивання від однієї поверхні підкладки (межа розділу середовищ 3 і 4).

$$T_{34} = \frac{4n_3}{(n_3 + 1)^2}, \quad R_{34} = \left(\frac{n_3 - 1}{n_3 + 1} \right)^2, \quad (3)$$

Співвідношення (2)–(6) є робочими формулами для визначення показника заломлення ферогранатової плівки n_2 та її товщини h_2 . Зрозуміло, що такі громіздкі розрахунки можна реально провадити тільки з використанням комп'ютера.

Показник заломлення плівки визначається за формулою

$$n_2 = 0.5(n_1 + n_3)\sqrt{c} \pm \sqrt{[(n_1 + n_3)\sqrt{c}]^2 - 4n_1 \cdot n_3}, \quad (4)$$

де c — контрастність інтерференційного фільтра,

$$c = \frac{T_{\max}}{T_{\min}}. \quad (5)$$

Значення $T_{\max} = T_{\max \text{ екстр}} + T'_{\max}$, а $T_{\min} = T_{\min \text{ екстр}} + T'_{\min}$.

Значення $T_{\max \text{ екстр}}$ і $T_{\min \text{ екстр}}$ — максимальні і мінімальні значення коефіцієнтів пропускання на експериментальній кривій $T(\gamma)$, де γ — хвильове число. Величини T'_{\max} і T'_{\min} визначаються за формулами

$$T'_{\max} = R_{34} - [(1 - T_{\max \text{ екстр}})R_{34}] \quad (6)$$

$$T'_{\min} = R_{34} - [(1 - T_{\min \text{ екстр}})R_{34}]. \quad (7)$$

Після визначення показника заломлення плівки n_2 по (4), її товщину знаходимо за формулою

$$h_2 = \frac{1}{4n_2(\gamma_{n+1} - \gamma_n)}, \quad (8)$$

де γ_{n+1} і γ_n — хвильові числа сусідніх екстремумів $T_{\max \text{ екстр}}$ або $T_{\min \text{ екстр}}$ на кривій $T(\gamma)$.

Експериментальні результати та їх обговорення

Розрахунки показників заломлення ферогранатових плівок і підкладок та товщин плівок виконувались на комп'ютері. У табл. 1 наведені значення показників заломлення підкладки $Gd_3Ga_5O_{12}$ для хвильового інтервалу від 0.5 до 5.167 мкм. Спостерігається незначне зменшення показника заломлення від 1.97 до 1.93 з ростом довжини хвилі (нормальна дисперсія). У табл. 2 наведені значення показників заломлення плівок ЗІГ і галій-заміщеного ЗІГ.

Таблиця 1

**Значення показників заломлення підкладки з ГГГ
при різних довжинах хвиль**

λ , мкм	n_3	λ , мкм	n_3	λ , мкм	n_3
0.500	1.97	0.825	1.95	2.000	1.93
0.625	1.97	0.849	1.95	2.695	1.93
0.649	1.96	0.874	1.95	2.873	1.93
0.674	1.96	0.900	1.95	3.062	1.93
0.699	1.96	0.925	1.95	3.286	1.93
0.725	1.96	0.950	1.95	3.552	1.93
0.750	1.96	1.000	1.95	3.856	1.93
0.775	1.96	1.100	1.94	4.640	1.93
0.800	1.95	1.200	1.94	5.167	1.93

У наведених спектральних інтервалах значення показників заломлення ферогранатових плівок зменшуються з ростом довжини хвилі, тобто також спостерігається явище нормальної дисперсії. Отримані нами значення показника заломлення для $Y_3Fe_5O_{12}$ добре узгоджуються з літературними даними. Наприклад, для $\lambda=1,6$ мкм за нашими даними $n=2,23$, а в роботі [7] – $n=2,20$. З порівняння даних з табл.2 видно, що заміщення частини іонів Fe^{3+} на іони Ga^{3+} зумовлює зменшення показника заломлення ферогранатових плівок. Зменшення показника заломлення при введенні в плівку ЗІГ іонів галію, очевидно, пов'язано з тим, що галій в основному заміщує іони заліза в тетраедричній підрешітці, які роблять основний внесок в поляризованість ЗІГ [5].

Таблиця 2

Значення показників заломлення ферогранатових плівок $Y_3Fe_5O_{12}$ і $Y_3Fe_{4,5}Ga_{0,5}O_{12}$ при різних довжинах хвиль

$Y_3Fe_5O_{12}$	λ , мкм	1.60	2.09	2.19	2.31	2.43	2.57	2.73	2.92	3.14	3.38	3.65	4.35	5.20
($h=5.1$ мкм)	n_2	2.23	2.22	2.21	2.23	2.22	2.23	2.23	2.23	2.17	2.18	2.15	2.14	2.12
$Y_3Fe_{4,5}Ga_{0,5}O_{12}$	λ , мкм	1.57	2.07	2.14	2.25	2.38	2.51	2.83	3.25	3.50	3.80	4.62	5.04	5.62
($h=7.2$ мкм)	n_2	2.08	2.06	2.07	2.06	2.06	2.06	2.06	2.05	2.05	2.04	2.04	2.04	2.05

З рис. 3 видно, що при збільшенні вмісту іонів Ga^{3+} зменшується значення коефіцієнта поглинання. Як встановлено в [6] на основі оптичних досліджень Ga -заміщених і Sc -заміщених ЗІГ, спостерігається загальна тенденція до зменшення поглинання при заміщенні заліза як в тетраедричних, так і в октаедричних положеннях.

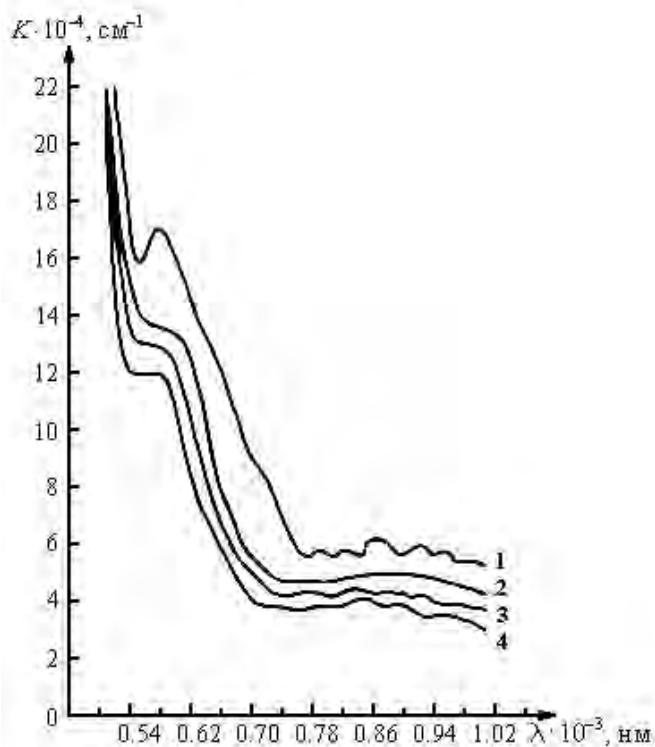


Рис. 3. Залежність коефіцієнта поглинання в плівках $Y_3Fe_{5-x}Ga_xO_{12}$ від довжини світлової хвилі: 1 – $x=0$; 2 – $x=0.1$; 3 – $x=0.3$; 4 – $x=0.5$

Спектри поглинання ферогранатів у видимій і близькій ІЧ-областях в основному визначаються переходами, пов'язаними з октаедричними іонами Fe^{3+} : ${}^6A_{1g} \rightarrow {}^4T_{1g}$ ($\lambda = 0.9\text{мкм}$), ${}^6A_{1g} \rightarrow {}^4T_{2g}$ ($\lambda = 0.7\text{мкм}$) і тетраедричними іонами Fe^{3+} : ${}^6A_1 \rightarrow {}^4T_1$ ($\lambda = 0.6\text{мкм}$) і ${}^6A_1 \rightarrow {}^4T_2$ ($\lambda = 0.52\text{мкм}$). Інтенсивність відповідних ліній поглинання, що відповідають цим переходам, зменшується при заміщенні октаедричних іонів Fe^{3+} іонами Sc^{3+} [6], або тетраедричних іонів Fe^{3+} іонами Ga^{3+} (рис. 3).

Висновки

Показано, що оптичний інтерференційний метод може бути успішно застосований для контролю товщини плівки і показників заломлення плівки та підкладки у ферогранатовій епітаксійній структурі. Товщину епітаксійних ферогранатових плівок до 10 мкм доцільно вимірювати саме інтерференційним методом як точнішим, порівняно з іншими методами. Точність вимірювання товщин плівок становить 2 %, показників заломлення плівки і підкладки – 0.1 %.

1. *Katada O., Minemoto H., Itoh N. // J. Appl. Phys. – 1994. – Vol.75, №10. – P.6801–6803.*
2. *Рандошкин В.В., Червоненкис А.Я. Прикладная магнитооптика. – М.: Энергоатомиздат. – 1990. – 320 с.*
3. *Рыков А.В. Спектрофотометрия тонкопленочных полупроводниковых структур. – М.: Сов. Радио. – 1975. – 175 с.*
4. *Черемухин Г.С., Кириенко Б.В., Гурдин Е.К. // Оптико-механическая промышленность. – 1976. – №6. – С.13–15.*
5. *Одарич В.А., Рубан В.А., Гульчук П.Ф. // Физ. тверд. тела. -1978. – Т.20, №11. – С.3477–3479.*
6. *Wemple S.H., Blank S.L., Seman J.A., Biolsi W.A. // Phys. Rev. B. – 1974. – Vol.9, №5. – P.2134–2144.*
7. *Jonson B., Watson A.K. // Brit. J. Appl. Phys. – 1965. – Vol 16. – P.475.*