

PACS numbers: 61.66.Fn, 75.50.-y, 75.70.-i, 76.50.+g, 85.70.Ge

Товсті епітаксійні плівки залізо-ітрійового гранату, вирощені на підкладках з перехідним шаром

С. І. Ющук

Національний університет «Львівська політехніка»,
вул. Степана Бандери, 12,
79013 Львів, Україна

Щоб унеможливити виникнення механічних напружень в системі плівка-підкладка і руйнування ферогранатової плівки, запропоновано на підкладці з галій-гадолінійового гранату $Gd_3Ga_5O_{12}$ (ГГГ) ($a_s = 12,383 \text{ \AA}$) нарощувати тонкі шари немагнітного гранату $Gd_{3-x}Y_xGa_5O_{12}$ (Y:ГГГ) ($0 \leq x \leq 0,2$) з від'ємним градієнтом параметра кристалічної ґратниці в напрямі до плівки залізо-ітрійового гранату $Y_3Fe_5O_{12}$ (ЗІГ) ($a_f = 12,376 \text{ \AA}$), яка вирощується методом рідкофазної епітаксії на перехідному шарі. Шляхом регулювання технологічних умов вирощування (температури та швидкості росту, ступені переохолодження розчину-розплаву) отримано перехідні шари Y:ГГГ товщиною від 2,2 до 6,4 мкм, параметр кристалічної ґратниці яких плавно змінюється від значення $12,3827 \text{ \AA}$ біля підкладки з ГГГ до $12,3762\text{--}12,3789 \text{ \AA}$ на поверхні шару. Плівки ЗІГ, вирощені на підкладках з перехідним шаром, мали товщини до 130 мкм і значення ширини лінії феромагнітного резонансу $\Delta H = (0,34\text{--}0,57) \text{ Е}$ при товщинах $\leq 73 \text{ мкм}$.

Ключові слова: плівки фериту-гранату, рідкофазна епітаксія, феромагнітний резонанс.

To prevent mechanical stress in a film-substrate system, there is suggested to grow up thin layers of a non-magnetic garnet $Gd_3Ga_5O_{12}$ (Y:GGG) ($0 \leq x \leq 0.2$) on a gadolinium gallium garnet $Gd_{3-x}Y_xGa_5O_{12}$ (GGG) ($a_s = 12.383 \text{ \AA}$) substrate.

Corresponding author: Stepan Ivanovych Yushchuk
E-mail: yushchuk.s.i@gmail.com

Lviv Polytechnic National University,
12 Bandera Str., UA-79013 Lviv, Ukraine

Citation: S. I. Yushchuk, Thick Epitaxial Films of Yttrium Iron Garnet Grown on Substrates with the Transitional Layer, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **41**, No. 12: 1667–1675 (2019) (in Ukrainian), DOI: [10.15407/mfint.41.12.1667](https://doi.org/10.15407/mfint.41.12.1667).

These thin layers have a negative gradient of a crystal lattice parameter towards on yttrium iron garnet $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (YIG) ($a_f = 12.376 \text{ \AA}$) film grown using liquid phase epitaxy method on the transitional layer. By regulating the technological conditions of growing (temperature and growth rate, solution-melt overcooling degree) the transitional layers Y:GGG in the thickness from 2.2 to 6.4 μm are received. Their crystal lattice parameter smoothly varies from a value of 12.3827 \AA near the substrate with GGG to 12.3762–12.3789 \AA on the surface of the layer. The YIG films grown up on the substrates with transitional layer have a thickness up to 130 μm , their ferromagnetic resonance line has a $\Delta H = (0.34\text{--}0.57) \text{ Oe}$ width with a thickness $\leq 73 \mu\text{m}$.

Key words: garnet ferrite films, liquid-phase epitaxy, ferromagnetic resonance.

Чтобы избежать возникновения механических напряжений в системе плёнка–подложка и разрушения феррогранатовой плёнки, предложено на подложке из галлий-гадолиниевого граната $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ (ГГГ) ($a_s = 12,383 \text{ \AA}$) наращивать тонкие слои немагнитного граната $\text{Gd}_{3-x}\text{Y}_x\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ (Y:ГГГ) ($0 \leq x \leq 0,2$) с отрицательным градиентом параметра кристаллической решётки в направлении к плёнке железо-иттриевого граната $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (ЖИГ) ($a_f = 12,376 \text{ \AA}$), которая выращивается методом жидкофазной эпитаксии на переходном слое. Регулируя технологические условия выращивания (температуру и скорость роста, степень переохлаждения раствора-расплава), получены переходные слои Y:ГГГ толщиной от 2,2 до 6,4 мкм, у которых параметр кристаллической решётки плавно меняется от значения 12,3827 \AA около подложки из ГГГ к 12,3762–12,3789 \AA на поверхности слоя. Плёнки ЖИГ, выращенные на подложках с переходным слоем, обладали толщинами до 130 мкм и значениями ширины линии ферромагнитного резонанса $\Delta H = (0,34\text{--}0,57) \text{ Э}$ при толщине $\leq 73 \text{ мкм}$.

Ключевые слова: плёнки феррита-граната, жидкофазная эпитаксия, ферромагнитный резонанс.

(Отримано 16 липня 2019 р.; остаточн. варіант — 8 жовтня 2019 р.)

1. ВСТУП

Епітаксійні плівки феритів-гранатів інтенсивно розробляють та досліджують для застосування в техніці надвисоких частот (НВЧ) [1], для оптичного запису і обробки інформації [2], в сенсорній техніці [3]. Для багатьох застосувань необхідні плівки товщиною 40 мкм і більше [1, 4]. Основною вимогою, яку висувають до НВЧ-пристроїв, які працюють на магнітостатичних хвилях (МСХ), є мінімальні магнітні втрати при поширенні МСХ. Магнітні втрати залежать від ширини лінії ΔH ферромагнітного резонансу (ФМР).

Чим вужча лінія ФМР, тим менші магнітні втрати. Отже, важливим є отримати товсті плівки залізо-іттриєвого гранату $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ з вузькою лінією ФМР.

Плівки ЗІГ епітаксійно вирощують на підкладках з гранату

$Gd_3Ga_5O_{12}$, який за своїми структурними параметрами є найбільш придатним з усіх монокристалів немагнітних гранатів іншого хімічного складу. Параметр кристалічної ґратниці ЗІГ становить $a_f = 12,376 \text{ \AA}$, а в ГГГ — $a_s = 12,383 \text{ \AA}$. Це неспівпадання параметрів не впливає на якість тонких, товщиною кілька мкм, плівок ЗІГ, але призводить до значних механічних напружень і навіть руйнування товстих (десятки мкм) плівок.

Впродовж останніх років усі зусилля технологів, які вирощують плівки ЗІГ, були направлені на усунення розбіжності параметрів ґратниць у системі плівка–підкладинка. В нашій роботі [5] було показано, що введення іонів La^{3+} в кристалічну ґратницю ЗІГ уможливило збільшити параметр ґратниці феритової плівки до значення, характерного для підкладинки з ГГГ, і тим самим усунути механічні напруження в плівці. Однак, заміна іонів ітрію в ЗІГ іонами лантану не дає змогу отримати плівки $La:ZIG$ з вузькою лінією ФМР ($\Delta H \leq 0,6 \text{ E}$) і товщинами, більшими за 60 мкм.

Метод, запропонований в [5], має ще один суттєвий недолік — він змінює поряд з параметром ґратниці та хімічний склад плівок ЗІГ, що в тій чи іншій мірі погіршує їх властивості. Тому ідеальним способом отримання товстих плівок ЗІГ було б їх вирощування на підкладинках з тим же параметром ґратниці, що й у ЗІГ.

Метою цієї роботи було знайти спосіб підігнати параметр кристалічної ґратниці підкладинки з ГГГ до значення, характерного для параметра ґратниці ЗІГ.

2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

Спосіб отримання товстих плівок ЗІГ був реалізований нами наступним чином. Методом рідкофазної епітаксії (РФЕ) на підкладинці з ГГГ орієнтації (111) вирощували шар немагнітного гранату $Gd_{3-x}Y_xGa_5O_{12}$ ($0 \leq x \leq 0,2$) товщиною декілька мікрон. Параметр кристалічної ґратниці цього шару повинен зменшуватись від значення, близького до $12,383 \text{ \AA}$ біля підкладинки з ГГГ, до значення близького до $12,376 \text{ \AA}$ біля плівки ЗІГ. Наступним кроком є нарощування на цьому проміжному шарі Y: ГГГ товстої плівки ЗІГ.

Склад шихти для вирощування плівок Y: ГГГ, молярні коефіцієнти Бланка–Нільсена [6] і температуру насичення розчину-розплаву (РР) наведено в табл. 1. Як флюс, який понижує температуру плавлення шихти, використано суміш оксидів свинцю і бору. Молярні коефіцієнти, за якими розраховують молярний і ваговий склади шихти, виражаються формулами:

$$R'_1 = \frac{Ga_2O_3}{Gd_2O_3 + Y_2O_3}, \quad R'_3 = \frac{PbO}{B_2O_3},$$

ТАБЛИЦЯ 1. Склад шихти, молярні відношення і температура насичення при вирощуванні епітаксійних шарів $Gd_{3-x}Y_xGa_5O_{12}$ ($0 \leq x \leq 0,2$).

TABLE 1. The charge composition, molar ratios and the temperature of saturation of growing $Gd_{3-x}Y_xGa_5O_{12}$ ($0 \leq x \leq 0.2$) epitaxial layers.

Склад шихти, % мол.					Молярні відношення, відн. од.				Температура насичення, К
PbO	B ₂ O ₃	Ga ₂ O ₃	Ga ₂ O ₃	Y ₂ O ₃	R ₁ '	R ₃	R ₄	R ₅	
80,74	6,56	0,38	12,20	0,12	24,4	12,31	0,127	0,32	1253

$$R_4 = \frac{Gd_2O_3 + Ga_2O_3 + Y_2O_3}{\sum \text{оксидів}}, \quad R_5 = \frac{Y_2O_3}{Gd_2O_3}.$$

Молярне відношення R_5 характеризує кількість оксиду ітрію, впроваджуваного в шихту для заміщення гадолінію. При зменшенні коефіцієнта R_3 зростає в'язкість РР, а при збільшенні R_3 понижується композиційна стабільність поля гранату, зростає леткість розчинника.

При епітаксійному вирощуванні плівок Y: ГГГ температура в зонах печі підтримувалась з точністю $\pm 0,1$ К. Послідовні етапи процесу РФЕ та їх температурні режими детально описані в нашій роботі [7]. Температуру насичення (T_n) розчину-розплаву визначали як температуру початку росту плівки при пробному введенні в РР підкладки. Ступінь переохолодження ΔT РР визначається різницею між температурами насичення T_n і вирощування T_p : $\Delta T = T_n - T_p$. Підкладки піддавали хіміко-механічній поліровці до 14 класу чистоти. Хімічне травлення перехідних шарів Y: ГГГ здійснювали 85% розчині ортофосфорної кислоти при температурі 420 К [8].

Товщину плівок $h \leq 10$ мкм вимірювали інтерференційним методом, а товстих плівок — з допомогою оптичного мікроскопа [9]. Ширину лінії ФМР плівок ЗПГ вимірювали неруйнуючим методом в інтервалі частот 1,2–4,0 ГГц [10]. Дослідження структури і складу епітаксійних плівок виконували з допомогою електронного мікроскопа з рентгенівським мікроаналізатором «Сомебах».

3. ОБҐРУНТУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ ТА ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Отримання шарів Y:ГГГ зі змінним по товщині параметром кристалічної ґратниці є можливим завдяки більш високому значенню коефіцієнта розподілу іонів Y^{3+} ($K_Y = 2,15$) порівняно з іонами Gd^{3+} ($K_{Gd} = 1,4$) та Pb^{2+} ($K_{Pb} = 0,02$) при високих температурах росту [6, 11]. У таких шарах ступінь заміщення іонів гадолінію на іони ітрію при зміні ступеня переохолодження в процесі росту змінюється по

товщині таким чином, що біля підкладинки з ГГГ значення x в формулі Gd–Y–Ga-гранату близьке до нуля, а на поверхні перехідного шару $x \approx 0,2$. Внаслідок того, що іонний радіус в Y^{3+} менший, ніж в Gd^{3+} (1,015 Å проти 1,11 Å), біля підкладинки з ГГГ параметр кристалічної ґратниці перехідного шару близький до параметра ґратниці ГГГ, а на поверхні цього шару його параметр ґратниці приблизно такий, як в ЗГГ.

В таблиці 2 наведено режими вирощування, товщини і параметри ґратниць серії плівок $Gd_{3-x}Y_xGa_5O_{12}$, вирощених на підкладинці з ГГГ.

У всіх випадках частота обертання підкладинки становила 60 об/хв. Як бачимо, для отримання Y: ГГГ-заміщених шарів з параметром ґратниці близьким до параметра ЗГГ, необхідно ріст виконувати з мінімальною швидкістю і при високій температурі (зразок № 2). Малі швидкості росту при високих температурах практично виключають можливість входження іонів свинцю в плівку. Якщо збільшувати ступінь переохолодження, зростають швидкість росту плівки і ступінь упродовження в її ґратницю іонів свинцю.

Крім зазначених вище факторів велику роль на початковій стадії росту плівок з від'ємним градієнтом параметра кристалічної ґратниці відіграє наявність підвищеного вмісту в розчині-розплаві оксиду бору. Підвищений вміст оксиду бору сприяє збільшенню розчинності підкладинки з ГГГ. Через це на початковій стадії росту плівок Y: ГГГ розчин-розплав в області біля підкладинки збіднений на іони Y^{3+} , але збагачений іонами Gd^{3+} і Ga^{3+} . Тому на підкладинці з ГГГ спочатку росте плівка з пониженим вмістом іонів Y^{3+} . При зростанні товщини епітаксійного шару зростає ступінь заміщення гадолінію ітрієм ($K_Y > K_{Gd}$) і прямує до значення, що задається складом вихідної шихти і умовами росту. В результаті утворюється перехідний немагнітний епітаксійний шар Y:ГГГ з додатним градієнтом концентрації ітрію в напрямі до поверхні, а отже і з від'ємним градієнтом параметра кристалічної ґратниці.

ТАБЛИЦЯ 2. Режими вирощування і параметри плівок $Gd_{3-x}Y_xGa_5O_{12}$

TABLE 2. The growing regimes and the parameters of $Gd_{3-x}Y_xGa_5O_{12}$ films.

№ зразка	Температура росту, К	Швидкість росту, мкм/хв	Ступінь переохолодження, К	Товщина плівки, мкм	Параметр ґратниці, Å	
					Підкладинка — ГГГ	Поверхня шару — Y:ГГГ
1	1250	0,12	3	2,2		12,3789
2	1248	0,15	5	3,8		12,3762
3	1243	0,23	10	4,1	12,3827	12,3768
4	1238	0,34	15	5,5		12,3776
5	1233	0,46	20	6,4		12,3785

На рисунку 1 показано зміну параметра ґратниці плівки Y:ГГГ по товщині в напрямі до підкладки з ГГГ, що проявляється по мірі травлювання плівки в ортофосфорній кислоті. Як бачимо, зі зменшенням товщини плівки параметр її ґратниці зростає, наближаючись до значення параметра кристалічної ґратниці підкладки з ГГГ. Завдяки плавній зміні параметра ґратниці плівок Y:ГГГ по товщині, такі плівки фактично позбавлені механічних напружень і можуть бути практично ідеальними підкладками для вирощування товстих плівок ЗПГ.

Для вирощування на таких підкладках плівок ЗПГ ми використовували шихту такого складу (в % мол.): PbO — 79,99; B₂O₃ — 5,13; Fe₂O₃ — 14,40; Y₂O₃ — 0,48. Температура насичення РР становила 1233 К. Режими вирощування товстих плівок ЗПГ і їх основні характеристики наведено в табл. 3.

З даних табл. 3 випливає, що при вирощуванні плівок ЗПГ товщиною порядку 100 мкм з мінімальними значеннями ΔH ФМР на перехідних шарах Y:ГГГ оптимальною швидкістю росту слід вважати значення $f_p \approx 0,6$ мкм/хв. На рис. 2 показано залежність ΔH ФМР від товщини плівок ЗПГ, вирощених на шарах Y:ГГГ (крива 1). На цьому ж рисунку для порівняння наведено аналогічну залежність для плівок ЗПГ з домішками іонів La³⁺, вирощених на звичай-

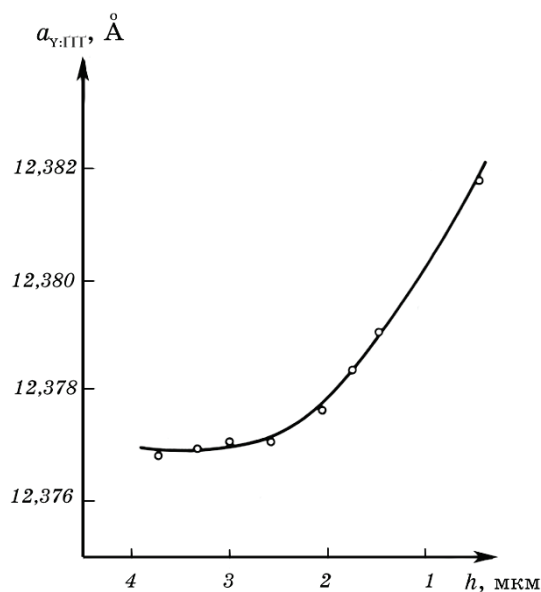


Рис. 1. Зміна параметра кристалічної ґратниці перехідного шару $Gd_{3-x}Y_xGa_5O_{12}$ ($0 \leq x \leq 0,2$) по мірі його травлювання.

Fig. 1. The variation of the parameter of crystal lattice of the $Gd_{3-x}Y_xGa_5O_{12}$ ($0 \leq x \leq 0.2$) transitional layer during the etching process.

них підкладках з ГГГ [5].

З рисунка 2 видно, що товсті плівки чистого ЗІГ в усьому інтер-

ТАБЛИЦЯ 3. Режими вирощування і основні характеристики товстих плівок ЗІГ, вирощених на підкладках ГГГ з перехідним шаром.

TABLE 3. The growing regimes and the basic characteristics of the thick YIG films grown on GGG substrates with the transitional layer.

№ зразка	Температура росту, К	Швидкість росту, мкм/хв	Ступінь переохолодження, К	Товщина плівки, мкм	Ширина лінії ФМР, Е
1	1226	0,49	7	15,8	0,36
2	1221	0,52	12	17,0	0,34
3	1213	0,56	20	22,5	0,41
4	1212	0,57	21	25,0	0,38
5	1208	0,59	25	37,2	0,45
6	1213	0,55	20	58,1	0,52
7	1210	0,57	23	73,0	0,57
8	1200	0,62	33	94,7	0,88
9	1203	0,59	30	112,3	1,13
10	1203	0,57	30	127,9	1,56

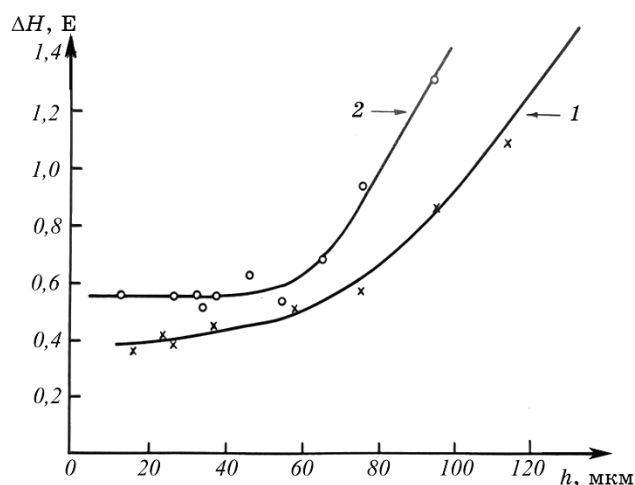


Рис. 2. Залежність ширини лінії ΔH ФМР від товщини ферогранатових плівок: 1 — плівки ЗІГ, вирощені на підкладках з перехідним шаром $Gd_{3-x}Y_xGa_5O_{12}$; 2 — плівки La:ЗІГ, в яких частина іонів ітрію замінена іонами лантану.

Fig. 2. The dependence of the FMR line width (ΔH) on the iron garnet films thickness (h): 1—the YIG films grown on substrates with the $Gd_{3-x}Y_xGa_5O_{12}$ transitional layer; 2—the La:YIG films in which a part of yttrium ions are replaced with lanthanum ions.

валі товщин володіють вузькими лініями ФМР ніж плівки La:ЗІГ (крива 2). Крім того, для плівок ЗІГ, вирощених на перехідних шарах Y:ГГГ, можна досягти більших граничних товщин (130 мкм), ніж для плівок La:ЗІГ (90 мкм).

Як і при вирощуванні La:ЗІГ плівок [5], загальним правилом для отримання товстих плівок ЗІГ на підкладках з Y:ГГГ є зниження температури РР під час росту. Маса вилучених гранатоутворюючих оксидів Fe₂O₃, Y₂O₃ визначали подібно тому, як це робилось для плівок La:ЗІГ [12]. У результаті експериментальних досліджень установлено, що при вирощуванні плівок ЗІГ товщиною понад 100 мкм на підкладках з Y:ГГГ з РР масою 12 кг зміна температури насичення за один ріст становить $\Delta T_n = -8,2$ К. Для збереження сталої швидкості росту необхідно впродовж усього процесу вирощування знижувати температуру розплаву з швидкістю 0,05 град/хв. Ріст товстих плівок чистого ЗІГ необхідно проводити з розчинів-розплавів великої маси з контрольованим вмістом гранатоутворюючих оксидів. Режимми витягування з розплаву та печі товстих плівок ЗІГ аналогічні режимам витягування тонких плівок ЗІГ [7].

4. ВИСНОВКИ

1. Вирощування товстих плівок ЗІГ на підкладках з перехідним шаром Y:ГГГ має свої особливості. Передусім необхідно звести до мінімуму вміст в плівці іонів свинцю, які призводять до неконтрольованих змін параметра кристалічної ґратниці і розширюють лінію ФМР. Для цього слід вибирати високі температури і низькі швидкості росту та невеликі ступені переохолодження.
2. При РФЕ плівок ЗІГ необхідно використовувати розчини-розплави великої маси (≈ 12 кг) з контрольованим вмістом гранатоутворюючих оксидів.
3. Товсті плівки чистого ЗІГ, вирощені на перехідних шарах Y:ГГГ, володіють вузькими лініями ФМР і більшими граничними значеннями товщини, ніж плівки La:ЗІГ.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. С. І. Ющук, С. А. Юрьев, П. С. Костюк, В. І. Бондар, *Технологии и конструирование в электронной аппаратуре*, № 3 (57): 22 (2005).
2. I. M. Syvorotka, S. B. Ubizskii, M. Kučera, M. Kuhn, and Z. Vertesy, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **34**: 1178 (2001).
3. С. В. Дубинко, *Ученые записки Симферопольского гос. университета*, № 4 (43): 30 (1997).
4. Eva Jakubisova-Liskova, Stefan Visnovsky, Houchen Chang, and Mingzhong Wu, *NASA Astrophysics Data System*, No. 5: 7 (2016).
5. С. І. Ющук, С. О. Юр'єв, О. Б. Біленька, О. М. Горіна, *Металлофиз. новей-*

- ше технол., **40**, № 9: 1247 (2018).
6. А. А. Балбашов, А. М. Червоненкис, *Магнитные материалы для микроэлектроники* (Москва: Энергия: 1979).
 7. В. І. Бондар, С. І. Ющук, С. О. Юр'єв, П. І. Юрчишин, І. П. Яремій, *Фізика і хімія твердого тіла*, **3**, № 2: 330 (2002).
 8. С. А. Юрьев, С. И. Ющук, *Приборы и техника эксперимента*, № 6: 101 (2013).
 9. С. І. Ющук, С. О. Юр'єв, В. І. Бондар, В. Й. Ніколайчук, С. Б. Харамбура, *Вісник НУ «Львівська політехніка». Серія Електроніка*, № 513: 153 (2004).
 10. С. И. Ющук, С. А. Юрьев, П. С. Костюк, В. И. Николайчук, *Приборы и техника эксперимента*, № 5: 118 (2011).
 11. А. Эшенфельдер, *Физика и техника цилиндрических магнитных доменов* (Москва: Мир: 1983).
 12. С. І. Ющук, С. О. Юр'єв, Н. Т. Покладок, *УФЖ*, **64**, № 3: 242 (2019).

REFERENCES

1. S. I. Yushchuk, S. A. Yuryev, P. S. Kostyuk, and V. I. Bondar, *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoy Apparature*, No. 3 (57): 22 (2005) (in Russian).
2. I. M. Syvorotka, S. B. Ubizskii, M. Kučera, M. Kuhn, and Z. Vertesy, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **34**: 1178 (2001).
3. S. V. Dubinko, *Uchyonye Zapiski Simferopolskogo Gosudarstvennogo Universiteta*, No. 4 (43): 30 (1997) (in Russian).
4. Eva Jakubisova-Liskova, Stefan Visnovsky, Houchen Chang, and Mingzhong Wu, *NASA Astrophysics Data System*, No. 5: 7 (2016).
5. S. I. Yushchuk, S. O. Yuryev, O. B. Bilenka, and O. M. Gorina, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **40**, No. 9: 1247 (2018) (in Ukrainian).
6. A. Balbashov and A. Chervonenkis, *Magnitnye Materialy dlya Mikroelektroniki* [Magnetic Materials for Microelectronics] (Moscow: Energiya: 1979) (in Russian).
7. V. I. Bondar, S. I. Yushchuk, S. O. Yuryev, P. I. Yurchishin, and I. P. Yaremiy, *Fizyka i Khimiya Tverdogo Tila*, **3**, No. 2: 330 (2002) (in Ukrainian).
8. S. A. Yuryev and S. I. Yushchuk, *Pribory i Tekhnika Eksperimenta*, No. 6: 101 (2013) (in Russian).
9. S. I. Yushchuk, S. O. Yuryev, V. I. Bondar, V. I. Nikolaichuk, and S. B. Harambura, *Visnyk Derzhavnoho Universytetu 'Lvivs'ka Politekhnika'. Ser. Elektronika*, No. 513: 153 (2004) (in Ukrainian).
10. S. I. Yushchuk, S. A. Yuryev, P. S. Kostyuk, and Nikolaichuk, *Pribory i Tekhnika Eksperimenta*, No. 5: 118 (2011) (in Russian).
11. A. Eschenfelder, *Fizika i Tekhnika Tsilindricheskikh Magnitnykh Domenov* [Physics and Technology of Cylindrical Magnetic Domains] (Moscow: Mir: 1983) (in Russian).
12. S. I. Yushchuk, S. O. Yuryev, and N. T. Pokladok, *Ukr. Fiz. Zhurn.*, **64**, No. 3: 242 (2019) (in Ukrainian).