



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **53935** (13) **U**  
(51) МПК (2009)  
С30В 30/00

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ

## ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

видається під  
відповідальність  
власника  
патенту

(54) МАГНІТОФОТОННИЙ КРИСТАЛ

1

2

(21) u201004038

(22) 06.04.2010

(24) 25.10.2010

(46) 25.10.2010, Бюл.№ 20, 2010 р.

(72) ШАПОШНИКОВ ОЛЕКСАНДР МИКОЛАЙОВИЧ,  
КАРАВАЙНИКОВ АНДРІЙ ВІКТОРОВИЧ, ПРОКО-  
ПОВ АНАТОЛІЙ РОМАНОВИЧ

(73) ТАВРІЙСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИ-  
ТЕТ ІМ. В.І. ВЕРНАДСЬКОГО

(57) Магнітофотонний кристал, що містить пари осаджених на підкладку магнітних і немагнітних шарів, що чергуються, магнітний шар виконаний з матеріалу хімічного складу  $\text{Bi}_{1,0}\text{Y}_{2,0}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ , немагнітний - з матеріалу хімічного складу  $\text{SiO}_2$ , який **відрізняється** тим, що додатково містить не менше однієї пари магнітного і немагнітного шарів, причому магнітний шар виконаний з матеріалу хімічного складу  $\text{Bi}_{1,5}\text{Gd}_{1,5}\text{Fe}_{3,8}\text{Ga}_{1,2}\text{O}_{12}$ .

Корисна модель відноситься до галузі виробництва кристалів і може бути використана для керування когерентними потоками світла в оптоелектронних і магнітофотонних приладах, системах відображення, зберігання і передавання інформації.

Відома багатошарова структура одновимірною магнітофотонного кристала (МФК), що включає в себе шари з двох матеріалів (М і L) з різними показниками заломлення, нанесені методами вакуумної технології на підкладку S з гадоліній-галієвого гранату (ГГГ), і які мають товщини порядку чверті довжини хвилі світла [Alamen Kamal and Grishin Alex. Magneto-opto photonic crystal multilayer structure having enhanced Faraday rotation with visible light. WO 2007/107941 A2]. Як матеріал М з великим показником заломлення ( $n_M=2,8$ ) використовується вісмут-заміщений залізо-ітрієвий гранат ( $\text{Bi:YIG}$ ), а як матеріал L з малим показником заломлення ( $n_L=1,97$ ) - ГГГ. Підсилення ефекту Фарадея в такій структурі відбувається за рахунок конструктивної інтерференції випромінювання, що поширюється перпендикулярно до площини структури і становить  $24^\circ/\text{мкм}$  у порівнянні з  $2^\circ/\text{мкм}$  поза структурою при такій же товщині шарів матеріалу М. Керування потоком випромінювання в пристроях на основі такої структури (наприклад, у магнітооптичних модуляторах і ізоляторах) відбувається за допомогою зовнішнього магнітного поля.

Недоліком пристроїв на основі такої структури є неможливість керувати їхніми властивостями за допомогою інших, крім магнітного поля, зовнішніх параметрів.

Як найближчий аналог обрано багатошарову періодичну структуру одновимірною МФК, що включає в себе нанесені на підкладку із плавленого кварцу 4 пари шарів з магнітного матеріалу М товщиною  $3\lambda_{PC}/4n_M$  і немагнітного матеріалу N товщиною  $\lambda_{PC}/4n_N$ , де  $n_M$  і  $n_N$  - показники заломлення магнітного і немагнітного шарів, відповідно,  $\lambda_{PC}$  - довжина хвилі, яка відповідає середині фотонної забороненої зони [A.A. Fedyanin, D. Kobayashi, K. Nishimura, H. Uchida, M. Inoue, O.A. Aktsipetrov. Observation of enhanced faraday effect in garnet-based magnetophotonic crystalsmater // Mater. Res. Soc. Symp. Proc., 2005., Vol. 834., J1.5.1-J1.5.4]. Як матеріал М використовуються шари вісмут-заміщеного залізо-ітрієвого гранату складу  $\text{Bi}_{1,0}\text{Y}_{2,0}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  ( $n_M=2,6$ ), а як матеріал N - шари  $\text{SiO}_2$  ( $n_N=1,47$ ), нанесені методом високочастотного розпилення відповідних мішеней. Підсилення ефекту Фарадея в такій структурі відбувається за рахунок локалізації світла в кожній з магнітних областей внаслідок конструктивної інтерференції випромінювання, що поширюється перпендикулярно до площини структури. У діапазоні довжин хвиль від 850 до 1100 нм у структурі існує фотонна заборонена зона, а на довжині хвилі 950 нм ефект Фарадея в 8 разів вищий, ніж у шарі  $\text{Bi}_{1,0}\text{Y}_{2,0}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  еквівалентної товщини. Наявність забороненої фотонної зони і підсилення ефекту Фарадея свідчить про те, що структура дійсно являє собою магнітофотонний кристал. Керування потоком випромінювання в пристроях на основі такої структури (наприклад, у магнітооптичних мо-

(19) **UA** (11) **53935** (13) **U**

дуляторах і ізоляторах) також відбувається за допомогою зовнішнього магнітного поля.

Недоліком пристроїв на основі такої структури є неможливість керувати їхніми властивостями за допомогою інших зовнішніх параметрів, крім магнітного поля.

В основу корисної моделі поставлено завдання вдосконалити структуру одновимірного МФК для підвищення його функціональності: для збільшення числа зовнішніх параметрів, що регулюють властивості пристроїв на основі такої структури.

Поставлене завдання вирішується тим, що магнітофотонний кристал, що включає пари осаджених на підкладку магнітних і немагнітних шарів, що чергуються, магнітний шар виконаний з матеріалу хімічного складу  $\text{Bi}_{1,0}\text{Y}_{2,0}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ , немагнітний - з матеріалу хімічного складу  $\text{SiO}_2$ , згідно з корисною моделлю, додатково містить не менше однієї пари магнітного і немагнітного шарів, причому магнітний шар виконаний з матеріалу хімічного складу  $\text{Bi}_{1,5}\text{Gd}_{1,5}\text{Fe}_{3,8}\text{Ga}_{1,2}\text{O}_{12}$ .

Така структура дозволяє керувати властивостями одновимірного магнітофотонного кристала за допомогою додаткового параметра: температури.

На (Fig.1) наведено схематичне зображення одновимірного МФК. Структура містить однакову кількість пар шарів  $M_1/N$  і  $M_2/N$ , осаджених на підкладку (1). Магнітні шари  $M_1$  (2) мають склад  $\text{Bi}_{1,0}\text{Y}_{2,0}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  і не мають точки компенсації магнітного моменту; немагнітний шар  $N$  (3) являє собою плівку двоокису кремнію  $\text{SiO}_2$  з показником заломлення  $n_N=1,50$ ; магнітні шари  $M_2$  (4) мають склад  $\text{Bi}_{1,5}\text{Gd}_{1,5}\text{Fe}_{3,8}\text{Ga}_{1,2}\text{O}_{12}$  і мають точку компенсації магнітного моменту при температурі  $T_{\text{comp}}=25^\circ\text{C}$ . Показники заломлення магнітних шарів  $M_1$  і  $M_2$  становлять  $n_M=2,55$ . Розрахунок товщин шарів проводився для довжини хвилі, яка відповідає центру забороненої фотонної зони  $\lambda_{\text{PC}}=600$  нм. Товщини кожного з магнітних і немагнітних шарів становили, відповідно,  $3\lambda_{\text{PC}}/4n_M=177$  нм і  $\lambda_{\text{PC}}/4n_N=100$  нм, загальна товщина магнітних шарів становила 708 нм, немагнітних - 400 нм. Загальна товщина магнітофотонного кристала (без урахування підкладки) становила 1108 нм.

Одновимірний МФК на основі такої структури працює так. Пристрій поміщується в зовнішнє магнітне поле  $H$ , яке перевищує поле насичення магнітних шарів. При температурі меншій  $T_{\text{comp}}$  магнітні шари  $M_1$  і  $M_2$  мають протилежні за знаком значення кута обертання Фарадея і, внаслідок цього, значення  $\Theta_F$  усієї структури, рівне сумі значень усіх магнітних шарів, буде малим (а при рівності товщин усіх магнітних шарів буде рівним нулю). Тому, підсилення світла в такому МФК буде мінімальним або навіть дорівнювати нулю, тобто на виході аналізатора сигнал буде мінімальним (або дорівнювати нулю). При цьому фотонна заборонена зона в кристалі існувати буде, тому що це оптичний, а не магнітооптичний параметр, який залежить тільки від значень показників заломлення шарів і їхніх товщин і не залежить від температури. При нагріванні структури до температури, що перевищує  $T_{\text{comp}}$ , відбудеться зміна знака кута обертання Фарадея шарів  $M_2$ , що мають точку компенсації магнітного моменту, на протилежний, і

значення  $\Theta_F$  усієї структури збільшиться, крім того, відбудеться його підсилення за рахунок конструктивної інтерференції, що має місце в МФК.

Як приклад конкретного виконання структури одновимірного МФК запропоновано багат шарову структуру, що складається з 4 пар шарів  $M_1/N$  і  $M_2/N$ , що чергуються, осаджених на підкладку  $S$  із плавненого кварцу. Магнітні шари  $M_1$  являють собою тонкі плівки  $\text{Bi}$ - заміщеного ферит-гранату складу  $\text{Bi}_{1,0}\text{Y}_{2,0}\text{Fe}_{5,0}\text{O}_{12}$  товщиною 177 нм кожний. Магнітні шари  $M_1$  являють собою тонкі плівки  $\text{Bi}$ ,  $\text{Gd}$ ,  $\text{Ga}$ -заміщеного ферит-гранату складу  $\text{Bi}_{1,5}\text{Gd}_{1,5}\text{Fe}_{3,8}\text{Ga}_{1,2}\text{O}_{12}$  тієї ж товщини, що і шари  $M_1$ . Магнітні шари  $M_1$  і  $M_2$  синтезовані методом реактивного іонно-променевого розпилення мішеней ферит-гранатів відповідних складів в атмосфері аргону з домішкою кисню з наступним відпалюванням отриманих плівок у вакуумній камері в присутності кисню. Немагнітні шари  $N$  являють собою тонкі плівки  $\text{SiO}_2$  товщиною 100 нм кожний, осажені методом реактивного іонно-променевого розпилення кварцової мішені в атмосфері аргону з домішкою кисню.

Вимірювання спектральних залежностей коефіцієнта пропускання і кута обертання Фарадея  $\Theta_F$  усієї структури проводили при температурах  $18^\circ\text{C}$  (тобто нижче  $T_{\text{comp}}$  магнітного шару  $M_2$ ) і  $35^\circ\text{C}$  (тобто вище  $T_{\text{comp}}$  магнітного шару  $M_2$ ) у діапазоні довжин хвиль від 450 до 750 нм. Величина постійного магнітного поля при вимірюванні ефекту Фарадея становила 4 кЕ. На (Fig.2a, б) наведено відповідні спектри при  $18^\circ\text{C}$  і  $35^\circ\text{C}$ . Як видно, спектральні залежності коефіцієнтів пропускання для обох температур однакові, середина максимуму поглинання лежить поблизу 600 нм, що відповідає розрахунковій довжині хвилі. У синтезованій структурі існує заборонена зона шириною приблизно 30 нм, що свідчить про те, що структура має властивості фотонного кристала.

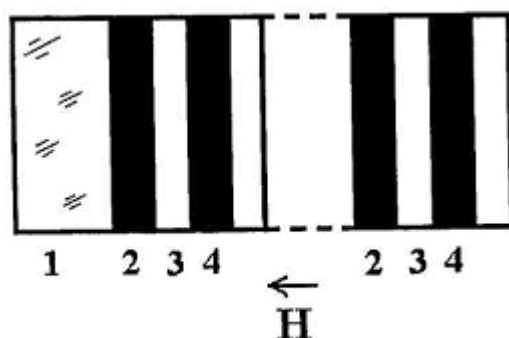
Спектральні залежності ефекту Фарадея при цих двох температурах навпаки, дуже сильно різняться. При  $18^\circ\text{C}$  у всьому спектральному діапазоні значення  $\Theta_F$  не перевищують сотих часток градуса, навіть на краях забороненої фотонної зони будь-які максимуми  $\Theta_F$  відсутні. Це свідчить про компенсацію магнітних моментів шарів  $M_1$  і  $M_2$  при цій температурі. Нагрівання структури до  $35^\circ\text{C}$  приводило до того, що на спектральній залежності  $\Theta_F$  з'являвся ряд максимумів, які відповідають максимальному пропусканню структури на цих довжинах хвиль. Наприклад, на довгохвильовому краї фотонної забороненої зони значення  $\Theta_F$  зростало до  $0,8^\circ$ , що приблизно в 10 разів перевищувало відповідне значення при  $18^\circ\text{C}$ . Це свідчило про те, що при  $35^\circ\text{C}$  структура має властивості магнітофотонного кристала.

На (Fig.3) наведено магнітооптичні петлі гістерезису (тобто залежності кута обертання Фарадея  $\Theta_F$  від поля намагнічування  $H$ ) виготовленого МФК, виміряні при температурах  $18^\circ\text{C}$  (а) і  $35^\circ\text{C}$  (б) за допомогою магнітополяриметра на ефекті Фарадея на довжині хвилі 655 нм. При  $18^\circ\text{C}$  петля гістерезису (ПГ) має дуже малу інтенсивність, масштабом по осі  $Y$  на Fig.3 (а) для наочності збільшений удвічі. Знак кута обертання свідчить про те, що

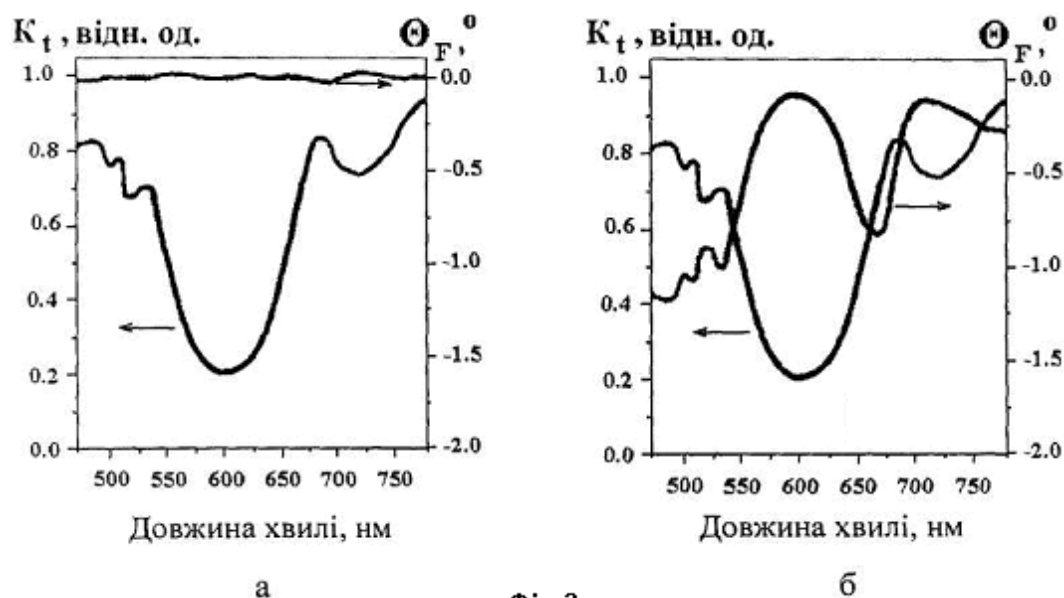
сумарний магнітний момент магнітних шарів структури визначається октаедричними підґратками шарів  $M_2$  ( $\text{Bi}_{1.5}\text{Gd}_{1.5}\text{Fe}_{3.8}\text{Ga}_{1.2}\text{O}_{12}$ ). Картина суттєво змінюється при  $35^\circ\text{C}$ : інтенсивність ПГ зростає приблизно в 10 разів, знак  $\Theta_F$  кута обертання змінюється на протилежний у порівнянні зі знаком при  $18^\circ\text{C}$ . Це означає, що в шарі  $M_2$  відбулася компенсація магнітного моменту, вектор намагніченості у всіх магнітних шарах структури при цій температурі має однаковий напрямок і сумарна

намагніченість усіх магнітних шарів визначається їх тетраедричними підґратками. При цьому ПГ при  $35^\circ\text{C}$  дуже схожа з ПГ одношарової плівки феритгранату і не проявляє ніяких ознак поділу на шари, що свідчить про те, що всі магнітні шари у виготовленому МФК зв'язані обмінними взаємодіями.

Перевагою пропонованого кристала є можливість додаткового керування його властивостями за допомогою температури.



Фіг. 1



Фіг. 2

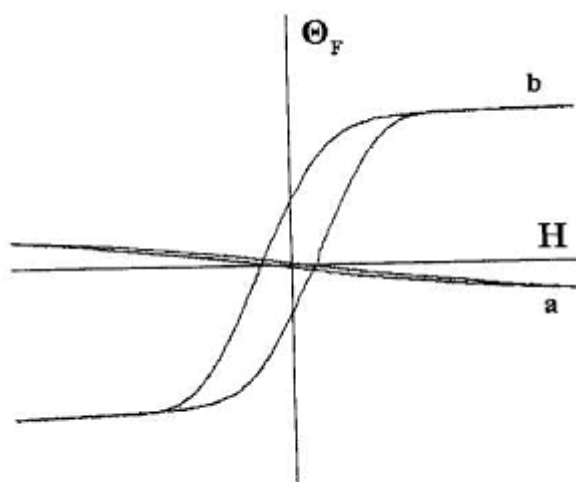


Fig. 3