

УДК 681.7.068 + 537.622

## МОДЕЛЬ МНОГОВОЛНОВОГО МАГНИТООПТИЧЕСКОГО ВРАЩАТЕЛЯ

*Басиладзе Г. Д., Бержанский В. Н., Долгов А. И., Прокопов А. Р.*

*Таврический национальный университет имени В. И. Вернадского, проспект Вернадского, 4,  
Симферополь 95007, Украина  
E-mail: [domain@crimea.edu](mailto:domain@crimea.edu)*

Предложена модель магнитооптического вращателя на основе магнитооптической пленки с плоским токонесящим элементом клиновидного профиля на ее поверхности для обеспечения одновременной модуляции плоскостей поляризации световых пучков с разными длинами волн с одинаковой угловой амплитудой. Представлены формулы для расчета геометрии профиля такого проводника и магнитооптической пленки в зависимости от диапазона рабочих длин волн и удельного фарадеевского вращения пленки в этом диапазоне.

**Ключевые слова:** фарадеевский вращатель, магнитооптическая пленка, оптический переключатель, оптическое волокно.

### ВВЕДЕНИЕ

Важным функциональным узлом модуляторов и переключателей света, действующих на основе эффекта Фарадея, является устройство, обеспечивающее вращение плоскости поляризации света, которое включает в себя магнитооптический (МО) элемент и намагничивающий его источник магнитного поля. В известных из работ [1-3] переключателях света, в качестве источника магнитного поля в МО вращателе использовали катушки с электропроводом, внутри которых располагали МО элемент. Более привлекательным для миниатюризации и увеличения быстродействия переключателя является МО вращатель, рассмотренный в [4], где используется структура в виде пленочного МО элемента с нанесенным на поверхность МО пленки плоским проводником тока с параллельными краями [5]. Свет в пленку такой структуры вводится через полированный торец и распространяется в плоскости пленки под проводником, перпендикулярно управляющему импульсному электрическому току. Поляризация света модулируется за счет планарной составляющей индуцированного током магнитного поля.

Во всех упомянутых работах МО вращатель в силу спектральной зависимости удельного фарадеевского вращения МО элемента предусматривал работу только на одной из длин волн телекоммуникационного спектрального диапазона. Для обеспечения возможности работы МО вращателя с несколькими длинами волн в работе [6] нами была предложена схожая с [4] структура, у которой в отличие от аналога плоский проводник на поверхности пленки имеет клиновидный профиль.

Целью настоящей работы являлась разработка физической модели такого МО вращателя и получение аналитических выражений для расчета геометрии его элементов в зависимости от рабочих длин волн устройства и удельного фарадеевского вращения, используемой МО пленки на этих длинах волн.

## 1. МОДЕЛЬ МНОГОВОЛНОВОГО МО ВРАЩАТЕЛЯ И ПРИНЯТЫЕ ДОПУЩЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ЕГО ЭЛЕМЕНТОВ

На рис. 1 схематично представлен многоволновый МО вращатель. Вращатель построен на основе плоского токнесущего элемента клиновидного профиля, обеспечивающего одинаковый угол фарадеевского вращения нескольких пучков света с разными длинами волн. Эти пучки вводятся в плоскость пленки и выводятся из нее оптическими волокнами через соответственно входной и выходной полированные торцы пленочного МО элемента. МО пленка при этом обладает магнитной анизотропией типа «легкая плоскость».

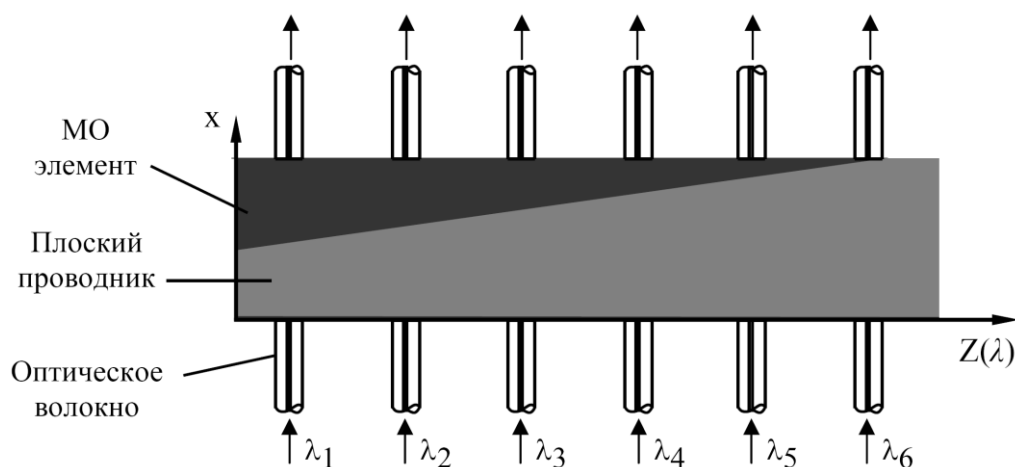


Рис. 1. Схематическое изображение МО вращателя с подсоединенными к нему оптическими волокнами для передачи сигналов с соответствующими длинами волн.

Каждая из  $N$  пар входного и выходного волокон, эквидистантно расположенных с двух сторон МО элемента работает на своей длине волны света. Причем длина волны  $\lambda_N$  увеличивается с увеличением порядкового номера световода. Иными словами рассматривается случай, когда за счет ширины токопровода, а, следовательно, и пути прохождения светом намагниченного участка МО пленки можно компенсировать изменяющееся с длиной волны света удельное фарадеевское вращение [6].

Как известно у подавляющего большинства исследованных в литературе МО материалов этот коэффициент уменьшается с увеличением длины волны. Поэтому примем это как первое допущение в нашем расчете.

Второе допущение, касается планарной составляющей магнитного поля, которая намагничивает МО пленку в плоскости вдоль пучка света под проводником с током. В нашем случае в качестве такого проводника предполагается использовать металлическую полосу, ширина  $w$  которой может превосходить ее толщину  $d$  на

величину от нескольких единиц до нескольких десятков раз. Согласно расчетам [7, 8] для планарной составляющей магнитного поля  $H_x$  плоского проводника с равномерно распределенной в поперечном сечении плотностью тока, на его краях должно происходить довольно резкое падение напряженности планарной составляющей магнитного поля. Поэтому, для случая относительно низкочастотного ( $\leq 1$  МГц) импульсного тока в нашем проводнике мы допускаем совпадение геометрических размеров профиля проводника и профиля планарной составляющей магнитного поля под ним. В качестве иллюстрации на рис. 2а приведен пример полученных нами экспериментально магнитооптических изображений медной полоски с параллельными краями и, для сравнения, на рис. 2б – с краями клиновидного профиля при одинаковых значениях постоянного электрического тока. Использовались медные полоски толщиной 50 мкм, шириной около 3 мм. Клиновидная полоска при этом в узкой части имела ширину около 1 мм. В качестве магнитооптического индикатора была использована эпитаксиальная пленка феррита-граната (ЭПФГ) с полосовой доменной структурой, ориентированной вдоль проводника, на поверхности которого располагали пленку.

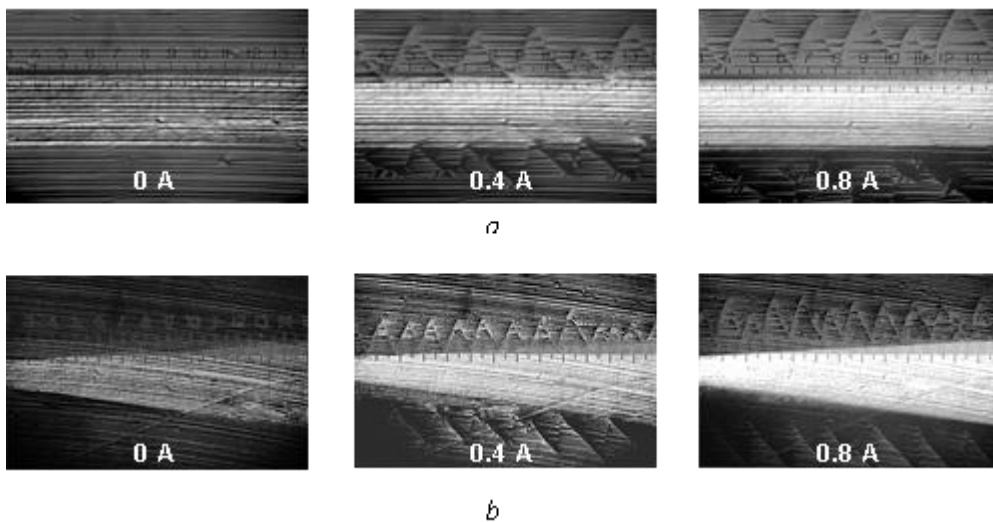


Рис. 2. Магнитооптические изображения плоского медного проводника: *a* – с параллельными краями и *b* – клиновидного, при различных значениях тока.

Наблюдения проводились в отраженном свете, поэтому при отсутствии тока в проводниках видны контуры обеих полосок. При включении тока видно, как по мере его увеличения все больше доменов в пределах контуров обеих токопроводящих полосок коллапсируют под действием планарной составляющей магнитного поля. Несколько неоднородное просветление изображения проводников объясняется неравномерным по плоскости пленки прилеганием к поверхности проводника, а также в случае клиновидного проводника, проявившимся в узкой части при токе 0,8 А продольным градиентом плотности тока. Наблюдаемые вдоль краев обоих проводников новые доменные структуры являются реакцией данного

образца индикаторной пленки на вертикальную составляющую магнитного поля. Образование доменов такого вида характерно для данного типа пленок с небольшими порядка  $10 \text{ \AA}$  компонентами плоскостной магнитной анизотропии. В целом же, на представленных фотографиях наблюдается явно выраженное отображение планарной составляющей магнитного поля, которое сосредоточено в пределах границ профилей проводников.

В качестве третьего допущения мы рассматриваем зависимость удельного фарадеевского вращения от длины волны  $\theta_F(\lambda)$ , как линейную функцию в пределах ближней инфракрасной области спектра 1250-1620 нм, где планируется использование МО вращателя. Такое допущение базируется на приведенных в работах [9, 10] зависимостях для некоторых висмут содержащих гранатовых материалов, которые в пределах погрешности менее 6 % могут быть аппроксимированы линейными функциями.

## 2. РАСЧЕТ ГЕОМЕТРИИ ТОКОНЕСУЩЕГО ЭЛЕМЕНТА МО ВРАЩАТЕЛЯ

Сначала получим выражение для расчета минимально необходимой протяженности  $Z_{\min}$  токонесущего элемента МО вращателя вдоль направления распространения тока. Для упрощения рассуждений примем два условия, которые целесообразны с точки зрения возможности технического воплощения. Во первых, в качестве минимально допустимой величины для  $\delta z$  ( $\delta z = Z_N - Z_{N-1}$ , см. рис. 3) примем расстояние между осями двух соприкасающихся волокон. К примеру, при использовании стандартных (G652) волокон  $\delta z$  будет составлять 125 мкм. Из соображений минимизации размеров устройства целесообразно два наиболее близких по спектру пучка подводить через волокна с расстоянием между ними равным  $\delta z$ . Второе условие заключается в том, что интервал между любыми из заданных рабочих длин волн должен вмещать в себя целое число  $N$  величин  $\delta \lambda$ , где  $N$  принимает значения 1, 2, 3, ...  $n$  в порядке возрастания длины волны от волокна с порядковым номером 1 (координата  $Z_1$  на рис. 3) до волокна с порядковым номером  $n$  (координата  $Z_N$  на рис. 3).

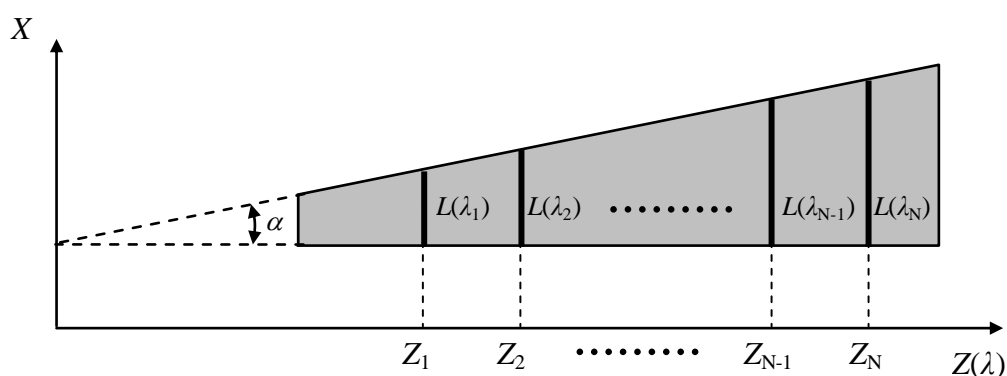


Рис. 3. Расчет геометрии токонесущего элемента МО вращателя.

Согласно этим условиям максимальное количество волновых каналов  $N_{\max}$ , уместяющихся в заданном рабочем диапазоне  $\Delta\lambda_{\text{раб}}$  и соответственно количество подводящих волокон, определится выражением

$$N_{\max} = \Delta\lambda_{\text{раб}}/\delta\lambda. \quad (1)$$

При  $n = N_{\max}$  минимально необходимая протяженность токонесущего элемента МО вращателя  $Z_{\min}$  и, соответственно, торца МО элемента для подсоединения  $N_{\max}$  волокон определится, как

$$Z_{\min} = N_{\max} \cdot \delta z, \quad (2)$$

или, через заданные волновые параметры

$$Z_{\min} = \delta z (\Delta\lambda_{\text{раб}}/\delta\lambda). \quad (3)$$

Следующим шагом получим выражение для расчета продольного размера  $X$  или минимально необходимого для работы устройства расстояния между торцами МО элемента, а также определим размеры клиновидного профиля токонесущего элемента вращателя.

Допустим, что необходимо модулировать световые потоки с длинами волн, расположенными в рабочем спектральном диапазоне

$$\Delta\lambda_{\text{раб}} = \lambda_{\max} - \lambda_{\min}, \quad (4)$$

где  $\lambda_{\max}$  и  $\lambda_{\min}$ , соответственно, максимальная и минимальная длины волн этого диапазона.

Размер  $X$  определяется длиной оптического пути пучка света, которая необходима для поворота плоскости поляризации света на заданный угол  $\Psi$ . Эта длина, в соответствии с первым нашим допущением, будет наибольшей ( $L_{\max}$ ) для пучка света с максимальной длиной волны  $\lambda_{\max}$ . В свою очередь длину оптического пути для получения заданного угла  $\Psi$  можно определить через удельное фарадеевское вращение МО элемента. Поэтому можем записать

$$L_{\max} = \Psi/\theta_{\text{F}}(\lambda_{\max}), \quad (5)$$

где  $L_{\max}$  – длина оптического пути пучка света с длиной волны  $\lambda_{\max}$ , необходимая для поворота плоскости поляризации света на заданный угол  $\Psi$ ;  $\theta_{\text{F}}(\lambda_{\max})$  – удельное фарадеевское вращение МО элемента на максимальной длине волны  $\lambda_{\max}$ .

Соответственно, размер  $X$  МО элемента в направлении распространения света может быть определен с помощью выражения (5) т. е.

$$X = L_{\max} = \Psi/\theta_{\text{F}}(\lambda_{\max}). \quad (6)$$

Поскольку мы предположили, что длину взаимодействия пучка света с магнитным полем определяет ширина проводника  $w$ , то формула (6) дает возможность вычислить и максимальную ширину клина, т.е.

$$w_{\max} = L_{\max} = \Psi/\theta_{\text{F}}(\lambda_{\max}). \quad (7)$$

Аналогично может быть вычислена минимальная ширина клиновидного профиля  $w_{\min}$  по формуле

$$w_{\min} = L_{\min} = \Psi/\theta_{\text{F}}(\lambda_{\min}). \quad (8)$$

Таким образом, записанная в общем виде формула

$$L(\lambda) = \Psi/\theta_F(\lambda) \quad (9)$$

для длины оптического пути света является ключевой для определения линейных размеров клиновидного профиля  $w(\lambda)$  в направлении распространения световых пучков с заданными длинами волн. Эти размеры могут быть вычислены, если известна функциональная зависимость  $\theta_F(\lambda)$  для применяемого магнитооптического материала. В каждом из пучков, проходящих путь, соответствующий определенному для него размером  $w(\lambda)$  местоположению в слое пленки под клином, плоскость поляризации должна повернуться на угол  $\Psi$ , при намагничивании пленки полем насыщения в направлении распространения света. Что касается функции  $\theta_F(\lambda)$ , то для вычислений в практических целях она может быть определена по методике, изложенной в работе [10], которая применялась при исследовании ЭПФГ, выращенной для изготовления МО элементов.

Используя формулу (9) и величины оптических путей для световых потоков с  $\lambda_{\max}$  и  $\lambda_{\min}$ , соответственно,  $L_{\max}$  и  $L_{\min}$  определим необходимый для образования требуемого клина (рис. 3) угол  $\alpha$  при его вершине

$$\operatorname{tg}(\alpha) = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{Z} = \frac{\frac{\Psi}{\theta_F(\lambda_{\max})} - \frac{\Psi}{\theta_F(\lambda_{\min})}}{Z} = \frac{\Psi[\theta_F(\lambda_{\min}) - \theta_F(\lambda_{\max})]}{Z \cdot \theta_F(\lambda_{\max}) \cdot \theta_F(\lambda_{\min})} \quad (10)$$

или же

$$\alpha = \operatorname{arctg} \left[ \frac{\Psi[\theta_F(\lambda_{\min}) - \theta_F(\lambda_{\max})]}{Z \cdot \theta_F(\lambda_{\max}) \cdot \theta_F(\lambda_{\min})} \right]. \quad (11)$$

Величина  $Z$  при этом, с одной стороны ограничена определяемой формулами (2) и (3) минимально допустимой протяженностью  $Z_{\min}$  токонесящего элемента, с другой стороны этот размер может быть увеличен. Так, например, из соображений технологичности образования связи волокон с торцом МО элемента целесообразно применение присоединительных чипов с V-образными канавками, где шаг для волокон может быть больше, чем 125 мкм. Увеличение  $Z$  и соответственно шага для волокон так же может быть вызвано необходимостью уменьшения градиента электрического сопротивления в клине путем уменьшения угла при его вершине. То есть параметр  $Z$  в последней формуле задается либо величиной  $Z_{\min}$ , либо может быть задан конкретной конструкцией МО вращателя.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана физическая модель МО вращателя на базе пленочного МО элемента с плоским токонесящим элементом клиновидного профиля на поверхности пленки. Ожидается, что такое устройство обеспечит одновременную модуляцию плоскостей поляризации световых пучков с разными длинами волн с одинаковой угловой амплитудой.

Модель построена на основе предположения о совпадении геометрических размеров профилей проводника и планарной составляющей магнитного поля под ним. Экспериментально получены магнитооптические изображения плоских

проводников с током, которые рассматриваются, как подтверждение корректности такого подхода.

Получены формулы, позволяющие рассчитать геометрию МО элемента и плоского проводника клиновидного профиля на его поверхности в зависимости от диапазона рабочих длин волн и удельного фарадеевского вращения МО элемента в этом диапазоне.

Результаты работы планируется использовать при разработке конструкции МО вращателя. Такой МО вращатель, встроенный в волоконно-оптическую цепь из двухканальных спектральных и поляризационных делителей/объединителей световых пучков может быть использован для коммутации многоволновых световых потоков в волоконно-оптических сетях связи [11].

Работа выполнена в рамках гранта № 306-13 Министерства образования и науки Украины.

#### Список литературы

1. High-speed all-fiber magneto-optic switch and its integration / Weng Zihua, Chen Zhimin, Huang Yuanqing [et al.] // Proc. SPIE. – 2005. – Vol. 6021. – P. 725–736.
2. Magneto-optic-based fiber switch for optical communications / R. Bahuguna, M. Mina, J. W. Tioh, R. J. Weber // IEEE Trans. Magn. – 2006. – Vol. 42, No. 10. – P. 3099–3101.
3. Ruan Jianjian. High-speed magneto-optic switch for optical communication / Jianjian Ruan, Zihua Weng, Shaohan Lin // Proc. of SPIE. – 2009. – Vol. 7509. – P. 75090B-1 – 75090B-9.
4. Analysis and design for ultrafast magneto-optic switch / Xu Chen, Zihua Weng, Shaohan Lin, Minfeng Wang // Proc. of SPIE. – 2008. – Vol. 7134. – P. 71341Z-1 – 71341Z-8.
5. Irvine S. E., Elezzabi A. Y. Wideband magneto-optic modulation in a bismuth-substituted yttrium iron garnet waveguide // Opt. Commun. – 2003. – Vol. 220. – P. 325–329.
6. Патент на полезную модель 70833 Украина, МПК G02F1/01. Магнитооптический вращатель плоскости поляризации света / Г. Д. Басиладзе, А. И. Долгов, В. Н. Бержанский; ТНУ. – № u201114805 ; заявл. 13.12.2011 ; опубл. 25.06.2012, Бюл. № 12.
7. Chumakov D. High frequency behaviour of magnetic thin film elements for microelectronics [Electronic resource]. – Mode access: [http://www.ifw-dresden.de/userfiles/groups/imw\\_folder/publications/theses/Dr\\_Chumakov.pdf](http://www.ifw-dresden.de/userfiles/groups/imw_folder/publications/theses/Dr_Chumakov.pdf), free.
8. Прокофьев Д. Д. Распределение магнитного поля, созданного током, протекающем по пластине, находящейся в сверхпроводящем и нормальном состоянии // ЖТФ. – 2006. – Т. 76, вып. 6. – С. 1–8.
9. Guang-Yu Zhang. Faraday rotation spectra of bismuth-substituted rare-earth iron garnet crystals in optical communication band / Guang-Yu Zhang, Xue-Wu Xu, Tow-Chong Chong // J. Appl. Phys. – 2004. – Vol. 95, No. 10. – P. 5267–5270.
10. Басиладзе Г. Д. Влияние спектральной зависимости коэффициента Фарадея на характеристики излучения, прошедшего планарный магнитоактивный элемент волоконно-оптического переключателя / Г. Д. Басиладзе, В. Н. Бержанский, А. И. Долгов // Ученые записки Таврического национального университета имени В. И. Вернадского. Серия: Физико-математические науки. – 2012. – Т. 25 (64), № 1. – С. 160–169.
11. Заявка на полезную модель № u201309450 Украина, МПК G02F1/09. Магнитооптический вращатель плоскости поляризации света / Г. Д. Басиладзе, А. И. Долгов, В. Н. Бержанский, Н. А. Фурсенко; ТНУ. – № u201309450 ; заявл. 29.07.2013.

**Модель багатохвильового магнітооптичного обертача / Г. Д. Басиладзе, В. Н. Бержанський, О. І. Долгов, А. Р. Прокопов // Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія : Фізико-математичні науки. – 2013. – Т. 26 (65), № 2. – С. 117-124.**

Запропоновано модель магнітооптичного обертача на основі магнітооптичної плівки із плоскої електропровідною шиною клиноподібного профілю на її поверхні для забезпечення одночасної модуляції площин поляризації світлових пучків з різними довжинами хвиль із однаковою кутковою амплітудою. Представлено формули для розрахунку геометрії профілю такого провідника і магнітооптичної плівки залежно від діапазону робочих довжин хвиль і питомого фарадєвського обертачання плівки в цьому діапазоні.

**Ключові слова:** фарадєвський обертач, магнітооптична плівка, оптичний перемикач, оптичне волокно.

**Model of the multi-wavelength magneto-optical rotator / G. D. Basiladze, V. N. Berzhansky, A. I. Dolgov, A. R. Prokopov // Scientific Notes of Taurida National V. I. Vernadsky University. – Series : Physics and Mathematics Sciences. – 2013. – Vol. 26 (65), No 2. – P. 117-124.**

The model of a magneto-optical rotator based on a magneto-optical film with the flat conductor of current on its surface is presented. Conductor has a wedge-shaped profile in order to provide simultaneous modulation of the planes of polarization of light beams with identical angular amplitude that have different wavelengths. The formulas for calculation of geometry of a profile of such conductor and of a magneto-optical film depending on the range of working wavelengths and specific Faraday rotation of a film in this range are presented.

**Keywords:** Faraday rotator, magneto-optical film, the optical switch, optical fiber.

#### References

1. Weng Zihua, Chen Zhimin, Huang Yuanqing, Zhu Yun, Wu Qinqing, Wu Dezhi, Yang Guoguang, *Proc. SPIE* **6021**, 725 (2005).
2. R. Bahuguna, M. Mina, J. W. Tioh, R. J. Weber, *IEEE Trans. Magn.* **42**, 3099 (2006).
3. Jianjian Ruan, Zihua Weng, Shaohan Lin, *Proc. SPIE* **7509**, 75090B (2009).
4. Xu Chen, Zihua Weng, Shaohan Lin, Minfeng Wang, *Proc. SPIE* **7134**, 71341Z (2008).
5. S. E. Irvine, A. Y. Elezzabi, *Opt. Commun.* **220**, 325 (2003).
6. G. D. Basiladze, A. I. Dolgov, V. N. Berzhansky, UA Patent No. 70833, Bull. No. 12 (2012).
7. D. Chumakov, High frequency behaviour of magnetic thin film elements for microelectronics, [http://www.ifw-dresden.de/userfiles/groups/imw\\_folder/publications/theses/Dr\\_Chumakov.pdf](http://www.ifw-dresden.de/userfiles/groups/imw_folder/publications/theses/Dr_Chumakov.pdf).
8. D. D. Prokof'ev, *Technical Physics* **51**, 675 (2006).
9. Guang-Yu Zhang, Xue-Wu Xu, Tow-Chong Chong, *J. Appl. Phys.* **95**, 5267 (2004).
10. G. D. Basiladze, V. N. Berzhansky, A. I. Dolgov, *Scientific Notes of Taurida National V. I. Vernadsky University, Ser. Physics and Mathematics Sciences* **25 (64)**, No. 1, 160 (2012).
11. G. D. Basiladze, A. I. Dolgov, V. N. Berzhansky, N. A. Fursenko, UA Patent Application No. u201309450, Filed Jul. 29 2013.

*Поступила в редакцію 30 июня 2013 г.*