

УДК 681.7.068 + 537.622

РАЗРАБОТКА МАГНИТООПТИЧЕСКОГО ВРАЩАТЕЛЯ ДЛЯ ОПТИЧЕСКОГО ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯ ДВУХВОЛНОВОГО СВЕТОВОГО ПОТОКА В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СЕТЯХ СВЯЗИ

Басиладзе Г. Д., Бержанский В. Н., Долгов А. И.

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

Показана возможность создания фарадеевского вращателя на основе двух планарно-ориентированных пленочных магнитооптических элементов для модуляции плоскостей поляризации двух световых потоков с длинами волн 1310 и 1550 нм с угловой амплитудой $\pm 45^\circ$. Рассмотрен пример использования такого вращателя в оптической схеме переключателя двухволнового светового потока.

Ключевые слова: магнитооптический вращатель, эпитаксиальная пленка феррит-граната, оптический переключатель.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из причин, препятствующих широкому внедрению полностью оптических WDM технологий в волоконно-оптических сетях связи, является отсутствие оптических коммутаторов, способных полностью заменить существующие устройства, в которых коммутация осуществляется посредством преобразования свет-электричество-свет. Решение этой проблемы на ближайшую перспективу связывают с развитием технологий оптического переключения, использующих активные оптические элементы, которые обеспечивают прохождение светового сигнала через коммутирующую систему.

Одна из таких технологий, в качестве активного оптического элемента, использует, обладающий эффектом Фарадея, магнитооптический (МО) материал. При приложении к нему, параллельно пучку света, импульсного магнитного поля происходит модуляция плоскости поляризации, подаваемого на вход МО элемента, линейно поляризованного света. Коммутация светового потока в таких переключателях осуществляется примыкающими к выходу МО элемента поляризационно-селективными разветвителями [1-3]. Магнитооптические вращатели (в данном случае МО элементы в совокупности с намагничивающими их катушками соленоида), в упомянутых работах содержали один МО элемент, который в силу спектральной зависимости коэффициента Фарадея предусматривал работу переключателя только на одной из длин волн спектрального телекоммуникационного диапазона.

Целью настоящей работы являлась проверка возможности практической реализации магнитооптического вращателя (МОВ) на основе двух планарно-ориентированных к его оптической оси МО элементов, каждый из которых действует на своей длине волны. Основная суть проблемы заключалась в получении из выращенной на 3-х дюймовой подложке эпитаксиальной пленки феррит-граната

(ЭПФГ) МО элементов, способных осуществлять равное по углу вращения плоскостей поляризации световых потоков с соответствующими МО элементам длинами волн, при совместном намагничивании одним индуктором магнитного поля.

1. СТРУКТУРА МОВ И ОДНА ИЗ ВОЗМОЖНЫХ СХЕМ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯ НА ЕГО ОСНОВЕ

Одна из возможных оптических схем переключателя световых потоков с длинами волн 1310 и 1550 нм, которая может быть реализована с помощью представляемого в данной работе МОВ, показана на рис. 1.

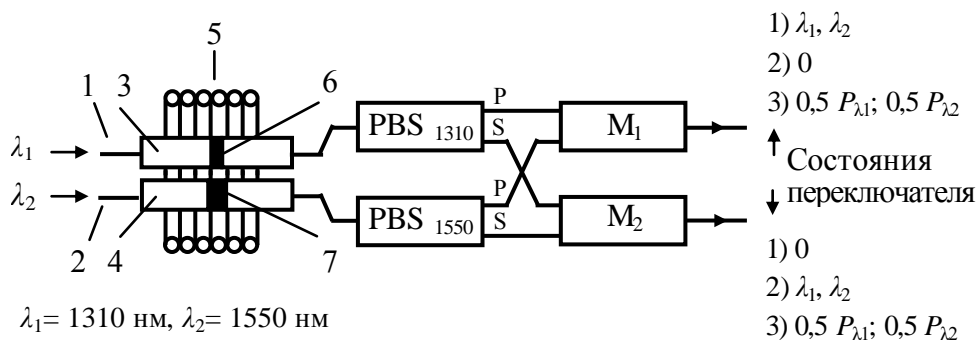


Рис. 1. Схема оптического переключателя.

Основными элементами МОВ являются индуктор магнитного поля 5 в виде соленоида и планарно-ориентированные к его оси МО элементы 6, 7, которые выполнены из ЭПФГ. К МО элементам со стороны входов подведены сохраняющие линейную поляризацию оптические волокна 1, 2 типа «Панда». Волокна соединены с МО элементами посредством плоских стеклянных наконечников 3 и 4. С выходов МО элементов с помощью аналогичных наконечникам 3, 4 соединений световые потоки с длинами волн 1310 и 1550 нм, через сохраняющие поляризацию волокна, подаются на поляризационно-селективные разветвители PBS_{1310} и PBS_{1550} . Поступающие на их входы световые сигналы расщепляются на ортогонально поляризованные S и P составляющие и попадают на входы спектральных мультиплексоров, где S составляющие обеих длин волн объединяются мультиплексором M_1 , а P составляющие – мультиплексором M_2 .

Распределение сигналов с длинами волн 1310 и 1550 нм на выходах этих мультиплексоров, т.е. переключателя зависит от состояния поляризации световых потоков на выходе МОВ. Поэтому размеры МО элементов L_{1310} и L_{1550} , для соответствующих длин волн в направлении распространения света, должны быть такими, чтобы при приложении магнитного поля насыщения H_S обеспечивался поворот плоскостей поляризации либо на 90° , если применяется одно полярно намагничивающее устройство, либо на $\pm 45^\circ$, если применяется двух полярно намагничивающее устройство. Необходимость модуляции поляризации с такой угловой амплитудой продиктована физическим механизмом действия поляризационных разветвителей, где одним из условий максимально полного разделения поступающих на их входы линейно поляризованных сигналов является

строгая ортогональность плоскостей поляризации этих сигналов.

В настоящей работе был смоделирован и исследован МОВ с двухполярно намагничивающим устройством. Переключатель с таким вращателем может находиться в трех состояниях и работает следующим образом.

Световые потоки, с длинами волн 1310 и 1550 нм, с одинаково ориентированными плоскостями поляризации через волоконные порты поступают на соответствующие им МО элементы МОВ. Когда в соленоиде отсутствует электрический ток, то обе плоскости поляризации на выходах МО элементов ориентированы под углом 45° к осям двулучепреломления входных волокон разветвителей PBS_{1310} и PBS_{1550} . В этом состоянии, световые потоки, поступающие на поляризационные разветвители, разделяются каждым из них на два равных потока и сигналы с обеими длинами волн направляются на оба мультиплексора. Таким образом, переключатель работает в режиме вещания. Соответствующее этому состоянию распределение сигналов между двумя выходными портами переключателя обозначено цифрой 3 на рис. 1.

При включении магнитного поля одной из полярностей, т. е. $+H_S$ или $-H_S$, в результате фарадеевского вращения на угол соответственно $+45^\circ$ или -45° плоскости поляризации световых потоков на выходах МО элементов ориентируются соответственно вдоль одной или другой оси двулучепреломления поляризационных волокон. В одном из этих состояний переключателя поляризационные разветвители направляют световые потоки со своей длиной волны на соответствующие входы одного из спектральных мультиплексоров и оба световых потока выйдут через его выходной порт или соответствующий ему выходной порт переключателя. Во втором из этих состояний, благодаря повороту плоскостей поляризации на 90° в обратном направлении, световые потоки будут перенаправлены поляризационными разветвителями во второй спектральный мультиплексор и выйдут со второго выходного порта переключателя. Соответствующие этим состояниям распределения сигналов между двумя выходными портами переключателя на рис. 1 обозначены цифрами 1 и 2.

2. РАСЧЕТ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ МО ЭЛЕМЕНТОВ МОВ

Как отмечалось выше, в нашем случае, переключение между выходными портами переключателя осуществляется магнитными полями $+H_S$ и $-H_S$, которые обеспечивают намагничивание ЭПФГ до насыщения, попеременно, в направлении и против направления распространения света в пленке. При этом для каждой из рабочих длин волн длина оптического пути $L(\lambda)$ в слое ЭПФГ, должна быть такой, что бы эффект Фарадея обеспечивал поворот плоскости поляризации света θ на величину $\pm 45^\circ$. Эти длины оптических путей или другими словами продольные размеры МО элементов вычисляются по формуле

$$L(\lambda) = \frac{45^\circ}{\theta_F(\lambda)}, \quad (1)$$

где $\theta_F(\lambda)$ – коэффициенты Фарадея для используемого ЭПФГ на рабочих длинах волн переключателя.

$\theta_F(\lambda)$ определялись нами по методике описанной в работе [4], позволяющей исследовать фарадеевское вращение на разных длинах волн ближнего инфракрасного диапазона при прохождении света в плоскости пленки.

Исходным материалом для изготовления МО элементов МОВ являлась ЭПФГ толщиной 12 мкм, состава $(\text{BiLuCa})_3(\text{FeGaV})_5\text{O}_{12}$, выращенная методом жидкофазной эпитаксии из раствор-расплава на ГГГ подложке с кристаллографической ориентацией 111, толщиной около 500 мкм, диаметром 76 мм. Удельные фарадеевские вращения данной ЭПФГ на длинах волн 1310 и 1550 нм составили соответственно 93,4 и 60,9 °/мм. ЭПФГ обладала магнитной анизотропией типа «угловая фаза» с полями насыщения вдоль осей легкого и трудного намагничивания напряженностью 1 и 30 Э, соответственно. На основе этого ЭПФГ, способом, кратко описанным в работе [5], для каждой из рабочих длин волн были изготовлены оптические модули ОВ-ЭПФГ. Эти модули представляли собой объединенные в единые конструкции МО элементы с присоединенными со стороны входов волокнами типа «Панда». Входной и выходной торцы пленки плоско параллельные и оптически отполированы для просвечивания в плоскости пленки так, чтобы свет распространялся вдоль оси ее легкого намагничивания. Продольные размеры МО элементов L_{1310} и L_{1550} в оптических модулях должны были удовлетворять вычисленным по выше приведенной формуле значениям, соответственно 0,48 и 0,74 мм. Эти значения служили ориентиром при определении продольной длины заготовок ЭПФГ для МО элементов с учетом запаса на шлифовку и полировку торцов пленки.

Отметим, что в нашем случае технология обработки торцов пленок включала операцию финишной полировки для минимизации нарушенного слоя ЭПФГ, который может ухудшить работу МО элемента в составе устройства. В процессе финишной полировки снимался слой толщиной порядка 1-2 мкм.

Изготовленный в настоящей работе МОВ был выполнен без примыкающих к выходным торцам МО элементов оптических волокон и следующих за ними остальных компонент переключающей схемы. Его особенностью было то, что оба модуля ОВ-ЭПФГ и намагничивающее устройство объединены в одну конструкцию и жестко в ней зафиксированы. Это обеспечивало неизменность условий намагничивания обоих МО элементов в процессе исследований. В качестве намагничивающего устройства, при этом использовался индуктор, в виде катушки соленоида из медного провода диаметром 0,67 мм. Число витков в катушке – 16, фактор упаковки $\approx 0,74$, длина соленоида – 11 мм, внутренний диаметр катушки 10 мм.

Модули ОВ-ЭПФГ, расположены внутри индуктора, таким образом, что их оптические оси параллельны оси соленоида.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В процессе исследования МОВ измерялись углы поворота и степень поляризации света на выходах модулей ОВ-ЭПФГ при намагничивании в прямом и обратном свете направлениях и при отсутствии поля, а так же оптические потери в модулях. Кроме того, исследовался отклик МОВ на перемагничивание импульсами магнитного поля с фиксированной частотой 125 кГц.

На рис. 2 приведена схема экспериментальной установки для исследования МОВ.

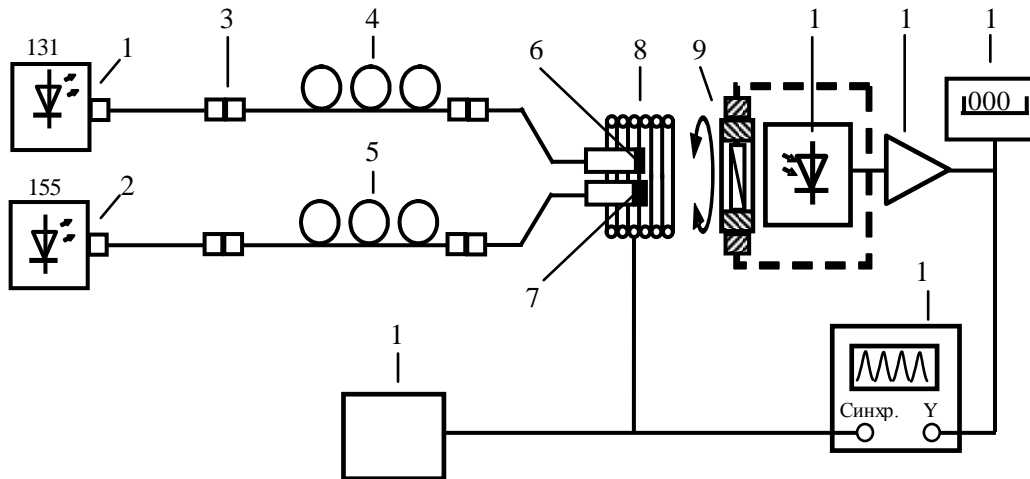


Рис. 2. Схема установки для исследования характеристик МОВ.

Излучение полупроводниковых лазеров 1 и 2 с длинами волн 1310 и 1550 нм с помощью волоконных разъемов 3 вводится в модули ОВ-ЭПФГ 6 и 7 магнитооптического вращателя через соответствующие волоконные регуляторы плоскостей поляризации света 4 и 5. Эти регуляторы в нашем случае, были настроены так, чтобы плоскости поляризации совпадали с плоскостями пленок. Такая ориентация считалась достигнутой, когда ось максимального пропускания анализатора поляризации 9 совпадала с плоскостью пленки в отсутствии магнитного поля. Измеренная при этом, степень поляризации света на выходе каждого из модулей ОВ-ЭПФГ МОВ была не хуже величины 0,98. Анализатор поляризации был снабжен лимбом, с помощью которого можно было отсчитывать поворот плоскости поляризации света с точностью 0,5°. Оптический сигнал с анализатора поляризации попадал на германиевый фотоприемник 10, подключенный к усилителю фототока 11. Усиленный электрический сигнал, пропорциональный интенсивности света на входе фотоприемника, поступал на вход цифрового вольтметра 12 при статических измерениях или канал вертикальной развертки осциллографа 14 при динамических измерениях.

При проведении измерений углов поворота и степени поляризации света напряженность магнитного поля можно было плавно изменять от -20 до +20 Э пропорционально изменению тока, проходящего через индуктор 8 от -1,5 до +1,5 А.

Измерения углов фарадеевского вращения дали следующие результаты. В оптическом канале с длиной волны 1310 нм угол поворота θ_{1310}° в обоих направлениях намагничивания МО элемента составил в среднем $\pm(45,7 \pm 0,5)^{\circ}$, в оптическом канале с длиной волны 1550 нм – $\theta_{1550}^{\circ} = \pm(45,2 \pm 0,5)^{\circ}$. При этом степень поляризации света на выходе обоих оптических каналов была не хуже величины 0,98.

При использовании МО пленки в модуляторе амплитуды или переключателе света, возможны отклонения плоскости поляризации от требуемого вращения на величину $\pm\Delta\theta$, вызванные, например, колебаниями λ в оптической сети. Эти отклонения могут привести к ухудшению коэффициента амплитудной модуляции

сигнала для модулятора или переходного затухания для переключателя. В этой связи следует отметить, что согласно расчетам, приведенным в [6], такие отклонения в пределах ширины полосы ± 40 нм возле длины волны 1550 нм составят всего 0,3 %. Поэтому можно прогнозировать, что в отличие, например, от ЭО модуляторов на основе ниобата лития, МО модулятор потенциально может обладать спектрально независимыми характеристиками в пределах рабочей полосы эрбиевых волоконных усилителей, которые имеют относительно ровный коэффициент усиления в диапазоне длин волн 1520-1570 нм. Это может быть использовано для создания оптических переключателей для WDM систем использующих DWDM технологию в диапазоне длин волн 1520-1570 нм.

При изучении отклика МОВ на перемещающееся магнитное поле источник магнитного поля подключался к импульсному блоку питания 13 (рис. 2), который выдавал прямоугольные импульсы напряжения с регулируемой амплитудой колебания до ± 5 В, длительностью 4 мкс при фиксированной частоте 125 кГц. Сигнал с фотодиода фотоприемного модуля через усилитель 11 поступал на измерительный вход осциллографа 14.

При включении источника магнитного поля и лазерного источника одного из оптических каналов на соответствующем ему выходе МОВ наблюдалась модуляция плоскости поляризации света. Анализатор при этом оставался в положении, фиксирующем 45-градусный поворот плоскости поляризации во время измерений угла поворота.

На рис. 3 показаны осциллограммы импульсов напряжения (снизу), подаваемых на источник магнитного поля, а также осциллограммы оптических импульсов (сверху), регистрируемых на каждом из двух выходов МОВ. Развертка осциллографа – 5 мкс/дел. Амплитуда импульсов напряжения на индукторе магнитного составляет величину ± 2 В. Это та амплитуда напряжения, при которой для использованной в МО вращателе ЭПФГ наступала намагнитченность насыщения, обеспечивающая заданный угол вращения поляризации, и, соответственно, максимальную амплитуду оптических импульсов в данном эксперименте.

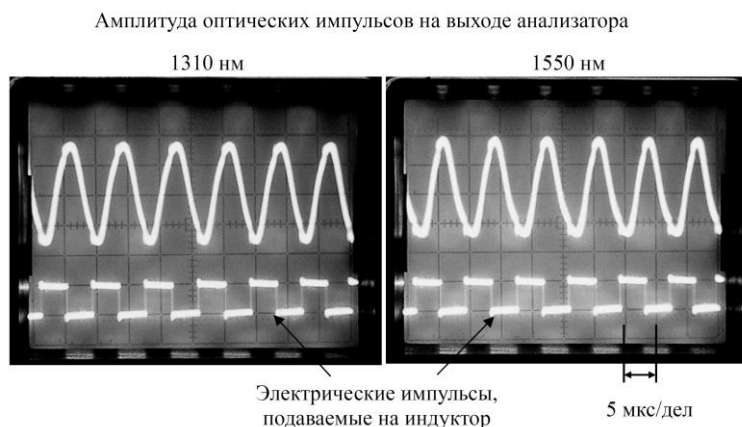


Рис. 3. Осциллограммы импульсов напряжения на индукторе магнитного поля (снизу) и оптических импульсов отклика фарадеевского вращателя (сверху).

Полученные осциллограммы показывают, что время нарастания и падения оптического сигнала для каждого из выходов МО вращателя на двух длинах волн 1310 и 1550 нм составляет примерно 4 мкс. То есть за такое время происходит переключение плоскостей поляризации в обоих оптических каналах МОВ. Следовательно, МОВ в представленном исполнении в состоянии обеспечить быстрое действие переключателя на уровне 4 мкс.

Наблюдаемый на осциллограммах наклонный характер фронтов оптических импульсов отклика МОВ на подаваемые импульсы напряжения объясняется довольно значительной индуктивностью используемого соленоида. При использовании индукторов магнитного поля другого типа, например, полосковой линии, это время может быть сокращено значительно. Так в работе [6] с такого рода индуктором магнитного поля, нанесенным на поверхность МО пленки, достигнута модуляция поляризации со временем между импульсами интенсивности на выходе анализатора около 1 наносекунды.

Вносимые МО вращателем оптические потери были измерены методом замещения при отключенном магнитном поле. В обоих длинноволновых каналах они были на уровне 1,5 дБ. Здесь основным источником потерь является френелевское отражение на границе раздела ОВ и ЭПФГ, которое связано с относительно большой разницей показателей преломления между сердцевинной волокна ($\approx 1,47$) и ЭПФГ ($\approx 2,3$). Эти потери могут быть заметно уменьшены подбором иммерсионного материала или нанесением антиотражающих покрытий на торцы пленок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показана возможность создания двухволнового магнитооптического вращателя на основе двух планарно-ориентированных к его оптической оси МО элементов, каждый из которых действует на своей длине волны света.

Продемонстрирован способ получения таких МО элементов. Изготовленные МО элементы обеспечили 45-градусный поворот плоскости поляризации света на заданных длинах волн при намагничивании их полем насыщения, ориентированным в прямом и обратном пучку света направлении в плоскости. Это достигается обеспечением необходимых продольных размеров МО элементов.

Магнитооптический вращатель обеспечивает одновременное вращение плоскостей поляризации двух световых потоков с длинами волн 1310 и 1550 нм на угол $\approx \pm 45^\circ$. Продольная длина МО элементов вращателя при этом составляла 0,48 и 0,74 мм, соответственно. Оптические потери устройства не превышают 1,5 дБ.

Такой магнитооптический вращатель, встроенный в волоконно-оптическую цепь из двухканальных спектральных и поляризационных делителей/объединителей световых пучков может быть использован для коммутации двухволновых световых потоков в волоконно-оптических сетях связи [7].

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. 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.
5. Basiladze G. D. Design of Faraday rotator for the optical switch / G. D. Basiladze, V. N. Berzhansky, A. I. Dolgov // 10th Intern. Conf. on Laser & Fiber-Optical Networks Modeling (LENM'2010), Sevastopol, Ukraine, 12-14 Sept. 2010 : proc. – [S. l.], 2010. – P. 158–160.
6. Irvine S. E. A miniature broadband bismuth-substituted yttrium iron garnet magneto-optic modulator / S. E. Irvine, A. Y. Elezzabi // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2003. – Vol. 36. – P. 2218–2221.
7. Патент на полезную модель 75525 Украина, МПК G02F1/09. Волоконный магнитооптический переключатель / А. И. Долгов, Г. Д. Басиладзе, В. Н. Бержанский, Н. А. Долгова ; ТНУ. – № u201204154 ; заявл. 4.04.2012 ; опубл. 10.12.2012, Бюл. № 23.

Басиладзе Г. Д. Розробка магнітооптичного обергача для оптичного перемикача двохвильового світлового потоку у волоконно-оптичних мережах зв'язку / Г. Д. Басиладзе, В. Н. Бержанський, О. І. Долгов // Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія : Фізико-математичні науки. – 2013. – Т. 26 (65), № 2. – С. 109-116.

Показано можливість створення фарадеевського обергача на основі двох планарно-орієнтованих плівкових магнітооптичних елементів для модуляції площин поляризації двох світлових потоків з довжинами хвиль 1310 і 1550 нм із кутовою амплітудою $\pm 45^\circ$. Розглянутий приклад використання такого обергача в оптичній схемі перемикача двохвильового світлового потоку.

Ключові слова: магнітооптичний обергач, епітаксialна плівка ферит-граната, оптичний перемикач.

Basiladze G. D. Design of magneto-optical rotator for the switch of a two-wave light flux in fiber-optic communication networks / G. D. Basiladze, V. N. Berzhansky, A. I. Dolgov // *Scientific Notes of Taurida National V. I. Vernadsky University. – Series : Physics and Mathematics Sciences.* – 2013. – Vol. 26 (65), No 2. – P. 109-116.

In the work the possibility of creation of the Faraday rotator based on two planar-oriented magneto-optical film elements for modulating the planes of polarization of the two light beams with wavelengths of 1310 and 1550 nm with angular amplitude of $\pm 45^\circ$ is shown. An example of using of such rotator in the optical scheme of the switch of a two-wave light flux is examined.

Keywords: magneto-optical rotator, epitaxial ferrite-garnet film, the optical switch, fiber-optic.

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**, No. 10, 3099 (2006).
3. Jianjian Ruan, Zihua Weng, Shaohan Lin, *Proc. SPIE* **7509**, 75090B-1 (2009).
4. 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).
5. G. D. Basiladze, V. N. Berzhansky, A. I. Dolgov, in *Proceedings of 10th International Conference on Laser & Fiber-Optical Networks Modeling (LENM'2010), Sevastopol, Ukraine, 12-14 Sept. 2010* (2010) p. 158.
6. S. E. Irvine, A. Y. Elezzabi, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **36**, 2218 (2003).
7. G. D. Basiladze, A. I. Dolgov, V. N. Berzhansky, UA Patent No. 75525, Bull. No. 23 (2012).

Поступила в редакцію 30 июня 2013 г.