

УДК 681.7.068 + 537.622

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ МОДУЛЬ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯ КАНАЛОВ НА БАЗЕ ЭПИТАКСИАЛЬНОЙ ПЛЕНКИ ФЕРРИТА ГРАНАТА

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

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

Экспериментально реализован и исследован оптический модуль, способный работать в волоконно-оптическом переключателе каналов. Модуль собран из набора четырех оптических волокон и эпитаксиальной пленки феррита граната (ЭПФГ), в котором торцы волокон состыкованы с входным торцом ЭПФГ. Длина ЭПФГ вдоль пути распространения света 3,88 мм, толщина – 12 мкм. ЭПФГ состава $(Bi\ Lu\ Ca)_3(Fe\ Ga)_5O_{12}$ обладала магнитной анизотропией типа угловая фаза и полем насыщения ≈ 50 Э. Величина фарадеевского вращения в насыщенном состоянии на длинах волн 1,31 и 1,55 мкм при намагничивании ЭПФГ полем в направлении распространения света составила 270° ($69,6^\circ\text{мм}^{-1}$) и 225° ($58,0^\circ\text{мм}^{-1}$), соответственно. При этом степень поляризации на выходе ЭПФГ достигала величины 0,98. Потери света в оптической цепи не превышали 1,75 дБ.

Ключевые слова: магнитооптический модулятор, магнитооптический переключатель, эпитаксиальная пленка феррита граната.

ВВЕДЕНИЕ

Одна из актуальных задач, связанных с развитием нового поколения волоконно-оптических сетей, заключается в создании оптически прозрачных переключателей, в которых отсутствует преобразование «свет-электричество-свет». Их действие может быть основано на различных физических принципах. Например, активно разрабатываются микроэлектромеханические, термооптические, акустооптические, электрооптические и другие переключающие системы.

Хотя о возможности использования магнитооптического эффекта в оптической коммутации давно известно [1], он еще не получил широкого распространения применительно к оптическим сетям из-за недостатка магнитооптических материалов с высоким фарадеевским вращением и ультрабыстрым откликом [2].

Появление подходящих по удельному фарадеевскому вращению в инфракрасной области спектра пленочных магнитооптических материалов стимулировало разработку переключающих систем на их основе. Одна из них предложена в работе [2], где магнитооптическая пленка (толщина ≈ 330 мкм) с лабиринтной доменной структурой ориентирована нормально торцам оптических волокон (ОВ). Эта пленка вращала плоскость поляризации света с длиной волны 1,31 мкм на $\pm 45^\circ$ при ее намагничивании в прямом и обратном распространении света направлении.

Следует также отметить, что современные магнито-оптические материалы обнаруживают рекордное быстродействие (порядка 100 фемтосекунд [3]), что

делает их перспективными для построения быстродействующих волоконно-оптических переключателей.

В настоящем сообщении представлены результаты исследования оптической цепи «ОВ-ЭПФГ», использующей эпитаксиальную пленку феррита-граната гораздо меньшей толщины, которая ориентирована планарно по отношению к волокнам в оптической цепи.

ЭПФГ выращена в технологической лаборатории ТНУ методом жидко фазной эпитаксии из раствора расплава. Целью работы являлось определение возможности ее использования в качестве фарадеевского вращателя для переключателя света.

Оптическая цепь была выполнена в виде оптического модуля жесткой конструкции, в которой четыре одномодовых волокна соединены в стык с входным торцом пленки.

Для этого в работе решалась технологическая задача реализации оптической связи между этими элементами.

1. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКОГО МОДУЛЯ

Для изготовления оптического модуля использовалась висмут содержащая пленка феррита-граната, состава $(Bi\ Lu\ Ca)_3 (Fe\ Ga)_5 O_{12}$ на подложке из гадолиний-галлиевого граната с ориентацией кристаллографических осей (111). Пленка обладала магнитной анизотропией типа «угловая фаза». Поле анизотропии в направлении оси легкого намагничивания ≈ 1 Э, в направлении оси трудного намагничивания ≈ 30 Э.

Удельное фарадеевское вращение на длине волны 0,655 мкм, измеренное в условиях перпендикулярного падения света на плоскость пленки составляло $1090^\circ \text{ мм}^{-1}$. Толщина пленки составляла ≈ 12 мкм, толщина подложки ≈ 500 мкм. На рис. 1 приведена микрофотография участка поверхности этой пленки, выполненная в скрещенных поляризаторах. На ней видна характерная для пленок с магнитной анизотропией типа «угловая фаза» доменная структура [4].

Из общей пластины такого материала был вырезан прямоугольный образец размером 5x3,5 мм так, чтобы ось легкого намагничивания располагалась параллельно длинной стороне. При такой конфигурации образца оптические волокна предусматривалось подводить с короткой стороны.

Для эффективной связи волокон с пленкой необходимо было обеспечить оптическое качество поверхности входного торца пленки, достаточную его плоскостность и перпендикулярность к осям волокон. То же самое требовалось обеспечить и для выходного торца пленки.

Были опробованы два метода подготовки торцов пленки. Это метод скола и метод механической шлифовки-полировки. Метод скола, реализуемый с помощью специальной машины для скрайбирования пленок, не давал гарантированной плоскопараллельности противоположных торцов пленки и необходимой оптической чистоты их поверхностей. Удовлетворительный результат был получен лишь с использованием метода механической шлифовки

и полировки. Для осуществления этой операции пленка была вклеена между двух стеклянных пластин. С целью предохранения внешней поверхности пленки от загрязнений и обеспечения волноводности магнитоактивного элемента в склеенной конструкции оптического модуля, предварительно, на внешнюю поверхность пленки нанесено тонкое покрытие ZrO_2 . В результате шлифовки и полировки двух противоположных торцов пленки, размер ее большей стороны (т.е. вдоль пути распространения света) был доведен до 3,88 мм.

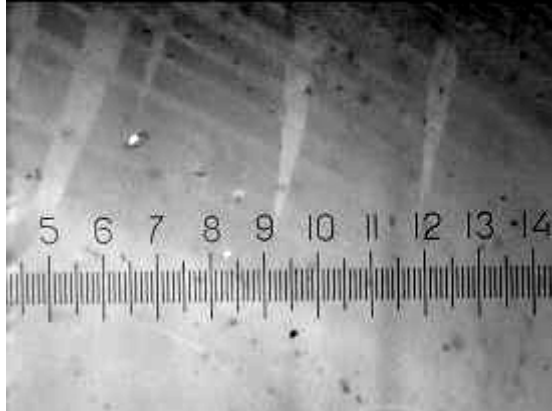


Рис. 1 Микрофотография участка поверхности ЭПФ, выполненная в скрещенных поляризаторах (цена деления шкалы 20 мкм).

На рис. 2 показаны торцы пленки, полученные методом скола и методом шлифовки-полировки.

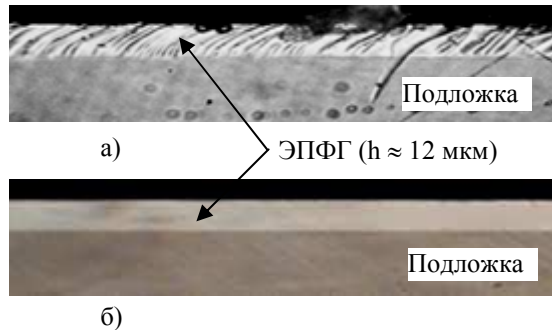


Рис. 2. Торцы пленки ЭПФ, полученный а) методом скола б) методом шлифования-полирования (увеличение 375^{\times} , подложка толщиной 500 мкм изображена не полностью).

Для ввода света в пленку один из ее отполированных торцов был жестко соединен с четырьмя оптическими волокнами следующим образом.

Волокна были вклеены между двух стеклянных пластин, как показано на рис. 3, где 1 и 3 - сохраняющие состояние линейной поляризации света волокна типа «Panda», а – 2 и 4 – обычные телекоммуникационные одномодовые волокна типа SMF 28e. Волокна располагались параллельно друг другу с шагом 0,7 мм и перпендикулярно торцу сэндвича. Причем, оси двулучепреломления волокон «Panda» в месте состыковки с пленкой ориентировались так, чтобы иметь возможность вводить в пленку свет, имеющий либо ТЕ, либо ТМ тип поляризации. Обычные же одномодовые волокна SMF 28e предусматривалось использовать для ввода в пленку света с произвольно заданным азимутом плоскости поляризации.

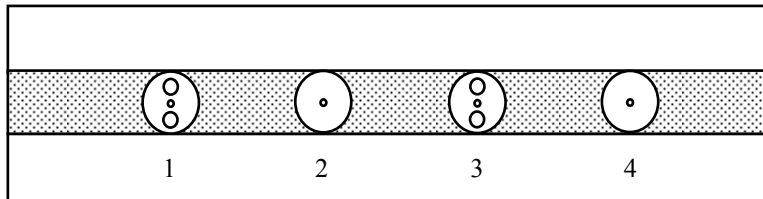


Рис. 3. Схематическое изображение торца оптического модуля.

Торец сэндвича вместе с торцами волокон также был отшлифован и отполирован. Из сэндвичей с ОВ и ЭПФГ формировался модуль «ОВ–ЭПФГ», где сердцевинны волокон были совмещены с торцом пленки, после чего сэндвичи фиксировались склейкой. Требуемая субмикронная точность совмещения волокон с пленкой была достигнута методом юстировки в плоскости [5], который был реализован с помощью стеклянного основания и калиброванной по толщине стеклянной подставкой под сэндвич с ЭПФГ. Фиксирование сэндвичей производилось в положении, когда проходящие из крайних волокон в пленку световые сигналы достигали на выходном торце пленки своих максимумов. При этом крайние волокна сэндвича были равноудалены от краев торца пленки.

Конструкция модуля «ОВ–ЭПФГ» схематично изображена на рис. 4.

Изготовленный таким образом оптический модуль «волокно – ЭПФГ» показан на рис. 5. Целостность конструкции оптического модуля значительно упрощала процесс исследования пленки, так как, при необходимости изменения условий эксперимента, обеспечивалось постоянство соединения волокон с пленкой, а ввод света в оптическое волокно осуществлялся с помощью удобных и легких в использовании стандартных оптических адаптеров.

Кроме того, конструкция модуля и используемая для механической обработки выходного торца пленки технологическая оснастка создавались с учетом необходимости обеспечения плоскопараллельности этого торца при повторных его обработках в процессе исследований. Возможность возбуждения пленки светом через пространственно разнесенные волокна позволяла исследовать оптические и магнитооптические свойства пленки вдоль оптических путей на разных ее участках.

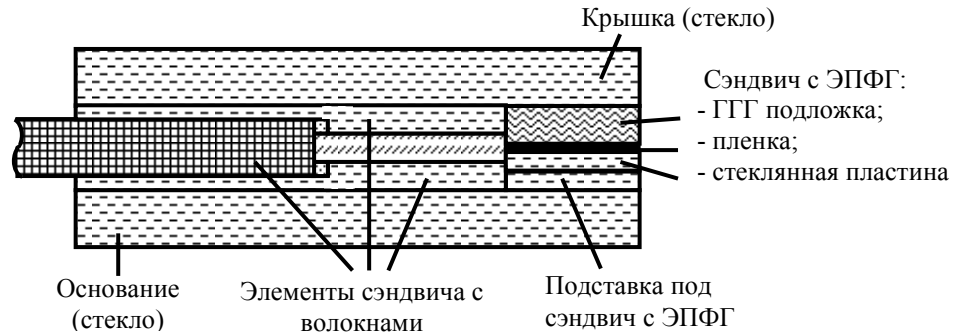


Рис. 4. Конструкция модуля «ОВ-ЭПФГ».

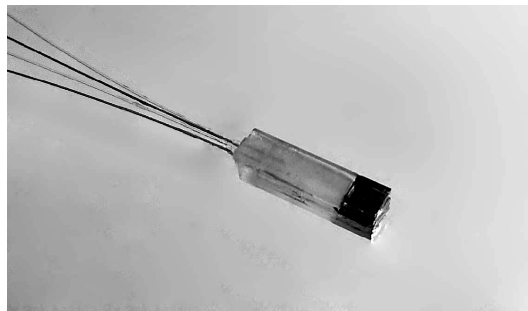


Рис. 5. Оптический модуль.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Постоянное магнитное поле, которое регулировалось в пределах от 0 до 300 Э, прикладывалось в плоскости модуля, попеременно по ходу и против хода распространения света в пленке. В экспериментах использовались два полупроводниковых лазера с длинами волн излучения 1,31 и 1,55 мкм. Линейно поляризованное излучение одного из этих источников, в зависимости от вида эксперимента, могло вводиться в пленку через один из входных световодов оптического модуля. Излучение на выходе анализировалось с помощью вращающегося поляризационного фильтра, сигнал с которого попадал на фотоприемное устройство. При этом могли регистрироваться максимальное (I_{\max}) и минимальное (I_{\min}) значения интенсивностей света на выходе фильтра. Наряду с этим, по лимбу могли определяться соответствующие углы поворота фильтра (θ), которые показывали ориентацию плоскости поляризации света на выходе пленки. Степень поляризации P определялась по формуле $P = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min}) \cdot 100\%$ с точностью $\pm 3\%$.

В таблице 1 приведены данные измерения степени поляризации света на выходе пленки для обеих длин волн при возбуждении в пленке светового поля с ТЕ поляризацией через волокна Panda. Измерения проводились при намагничивании пленки в плоскости полем насыщения в прямом и обратном

распространению света направлениях. Также показана степень поляризации в отсутствии магнитного поля.

Из приведенных данных видно, что исследованная пленка в своем объеме оптически не однородна. Судя по результатам из таблицы 1 можно говорить о неоднородностях магнитного и немагнитного происхождения.

Таблица 1

Степень поляризации света на выходе оптического модуля при возбуждении в пленке оптического поля типа ТЕ

Направление поля намагничивания	Волокно 1 (Panda)		Волокно 3 (Panda)	
	$\lambda=1,31$ мкм	$\lambda=1,55$ мкм	$\lambda=1,31$ мкм	$\lambda=1,55$ мкм
По направлению света	0,98	0,91	0,81	0,94
Поле отсутствует	0,87	0,95	0,76	0,94
Против направления света	0,98	0,97	0,74	0,94

К неоднородностям магнитного характера может быть отнесена доменная структура пленки, которая проявляется в ненасыщенном состоянии (рис. 1) Кроме того, могут существовать магнитные микро неоднородности локализованные в окрестностях механических микродефектов. О влиянии неоднородностей магнитного характера на поляризацию света на выходе пленки говорит тот факт, что их деполяризующее действие, как правило, уменьшается при включении магнитного поля.

Природа второго деполяризующего фактора, связана с возможным существованием микродефектов, как в объеме материала пленки, так и на границах раздела с подложкой и верхним отражающим слоем. Видимо по этой причине деполяризация света длиной волны 1,31 мкм в канале 3 в среднем на 17% выше, чем в канале 1.

Отмеченные неоднородности в пленке могут быть обусловлены переходным слоем пленка-подложка, свойства которой зависят как от качества поверхности подложки, так и от ряда технологических факторов. Кроме того, они могут наводиться и в процессе шлифования и полирования торцов пленки. Очевидно, эти недостатки могут быть минимизированы путем совершенствования технологии получения пленки и ее обработки.

Измерения степени поляризации в отсутствии магнитного поля, когда пленка через волокна типа SMF 28e возбуждалась излучением, азимут плоскости поляризации которого, составлял примерно 45° , свидетельствуют о незначительном деполяризующем влиянии двулучепреломления формы исследуемой пленки. Так, степень поляризации на ее выходе при таком возбуждении не падала ниже значения 0,94. Это говорит о том, что реализованное соединение волокна с пленкой обеспечивает возбуждение в

пленке моды низшего порядка. Следует отметить, что включение магнитного поля так же, как и в описанных выше случаях, приводило к улучшению степени поляризации света на выходе пленки.

Что касается эффекта Фарадея, то при повышении напряженности поля от 0 до 50 Э наблюдалось вращение плоскости поляризации света на выходе пленки. Поворот плоскости поляризации при намагничивании в прямом и противоположном световому потоку направлениях на длине волны 1,31 мкм составил $\pm 270^\circ$.

При таких же условиях на длине волны света 1,55 мкм поворот составил $\pm 225^\circ$.

Из последних результатов следует, что для достижения необходимых для работы переключателя поворотов плоскости поляризации на величину $\pm 45^\circ$, длина пути прохождения света в пленке должна быть уменьшена. Так, для работы на длине волны 1,31 мкм, размер пленки вдоль пути распространения света, в нашем случае, должен составлять примерно 0,65 мм, а для работы на длине волны 1,55 мкм, примерно 0,78 мм. При необходимости же вращения плоскости поляризации на 90° в режиме однополюсного включения магнитного поля этот размер должен составлять соответственно 1,29 и 1,55 мм.

Из значений степени поляризации на выходе оптического модуля полученных при приложении к пленке поля порядка 50 Э, можно сделать вывод о достаточно высокой эффективности взаимного преобразования ТЕ \leftrightarrow ТМ оптических мод в пленке.

Для оценки затухания света в пленке и качества согласования волокон с ее торцом были определены совокупные потери света α в оптическом модуле на длине волны света 1,31 мкм. Они вычислялись по формуле

$$\alpha = -10 \cdot \log(I_{\text{Вх}}/I_{\text{Вых}}), \quad (1)$$

где $I_{\text{Вх}}$ – интенсивность оптического сигнала вводимого во входное волокно модуля. $I_{\text{Вых}}$ – интенсивность света на выходе модуля «ОВ–ЭПФГ», измеренная в отсутствие поляризационного фильтра.

Эти потери были измерены для каждого из каналов в отдельности (т.е. при введении света через каждое из входных волокон модуля в отдельности). В результате произведенных измерений потери света в модуле в среднем составили 1,73 дБ (соответствует светопропусканию на уровне 67%).

Затухание в материале ЭПФГ ($\alpha_{\text{ЭПФГ}}$) было оценено по формуле:

$$\alpha_{\text{ЭПФГ}} = \alpha - \alpha_{\text{Фр}}, \quad (2)$$

где $\alpha_{\text{Фр}}$ – френелевские потери на отражение от входной и выходной торцевых поверхностей ЭПФГ в модуле.

Так как числовая апертура одномодового волокна $NA = 0,1$, что в угловой мере составляет $\approx 5,7^\circ$, то потери на френелевское отражение рассчитывались в приближении нормального падения света на границу раздела двух сред. При $n_{\text{ЭПФГ}} \approx 2,2$ в предположении, что между торцами волокон и входным торцом пленки имеется воздушный зазор ($n_{\text{Воздуха}} = 1$), оцененные суммарные потери на отражение от двух торцов ЭПФГ составили $\alpha_{\text{Фр}} \approx 1,32$ дБ.

Следовательно, расчетное затухание света в пленке на длине волны 1,31 мкм при наших допущениях без учета потерь на френелевские отражения составляет величину около 0,4 дБ ($\approx 9\%$).

Для прогнозирования световых потерь при подключении одномодовых оптических волокон к выходным торцам пленок были произведены измерения вносимых оптической цепью «волокно – пленка - волокно» потерь при размере пленки вдоль пути распространения света 3,88 мм. Среднее значение вносимых потерь на длине волны 1,31 мкм составило ≈ 18 дБ. Это хорошо согласуется с расчетным значением (≈ 19 дБ), выполненным в представлениях геометрической оптики. В расчетах использовали отношение площади расширенного пучка на выходе пленки к площади сердцевины приемного одномодового волокна. Это позволяет оценить величину вносимых потерь во вращателе с магнитоактивным элементом длиной 0,65 мм. Расчетные вносимые потери в таком ротаторе получаются на уровне 11 – 12 дБ. При таких вносимых потерях можно будет моделировать работу переключателя для определения его скоростных возможностей, перекрестных помех и других оптических характеристик.

Следует отметить, что потери на соединение волокон оптической цепи переключателя с выходным торцом пленки могут быть существенно снижены. Для этого, например, подобно работе [6] на поверхности пленки могут быть выполнены соразмерные с диаметром сердцевины волокна волноводные каналы, которые достаточно эффективно могут быть согласованы с одномодовыми волоконно-оптическими элементами переключателя без применения дополнительной коллимирующей оптики. Кроме того, торцевая стыковка волокон и ЭПФГ может быть осуществлена через иммерсию со средним значением показателя преломления между волокном и пленкой или с использованием просветляющих покрытий на торцах.

Существует также возможность использовать технологию формирования планарных микролинз [7], или микролинз выполненных на основе одномодовых волокон [8, 9], которые обеспечивают коллимацию светового пучка, вводимого через входное волокно и его фокусировку на торец выходного волокна. Первая технология может упростить задачу оптического согласования волокон с ЭПФГ толщиной 9-10 мкм. Для применения второй технологии потребуются пленки толщиной 30-40 мкм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создан оптический модуль, который позволил исследовать свойства магнитоактивного элемента в виде эпитаксиальной пленки феррита граната, для работы в переключателе света при торцевом введении оптического излучения. Опробованная на экспериментальной базе ТНУ технология торцевого соединения магнитоактивного пленочного элемента с одномодовыми световодами обеспечила пропускание света по оптической цепи «ОВ-ЭПФГ» на уровне 67% .

Исследован эффект Фарадея при распространении света вдоль плоскости пленки в направлении оси легкого намагничивания. При намагничивании пленки полем насыщения до 50 Э удельное фарадеевское вращение на длинах волн 1,31 и 1,55 мкм составило 69,6 и 58,0 °мм⁻¹, соответственно. Степень поляризации на выходе пленки при этом достигала величины 0,98.

Полученные результаты могут представлять интерес для разработчиков волоконно-оптических модуляторов и переключателей, а так же датчиков магнитного поля.

Список литературы

1. Интегральная оптика / Под ред. Т. Тамира. – М.: Мир, 1978.
2. Magneto-optic-based fiber switch for optical communications / Bahuguna R., Mina M., Tioh J.-W., Weber R.J. // IEEE Trans. Magn. – 2006. – Vol. 42, N 10. – P. 3099-3101.
3. Femtosecond photomagnetic switching of spins in ferrimagnetic garnet films / Hansteen F., Kimel A., Kirilyuk A., Rasing T. // Phys. Rev. Lett. – 2005. – Vol. 95, N 4. – P. 047402.
4. Особенности магнитоиндуцированного спин-переориентационного перехода в феррит-гранатовых пленках с анизотропией "угловая фаза" / Прокопов А. Р., Дубинко С. В., Хребтов А. О., Еремина М. И. // ФТТ. – 1997. – Т. 39, № 8. – С. 1415-1420.
5. A hybrid integrated waveguide isolator on a silica-based planar waveguide circuit / Sugimoto N., Terui H., Tate A., Katoh Y. et al. // J. Lightwave Technology. – 1996. – V. 14. – P. 2537.
6. Etch-tuned ridged waveguide magneto-optic isolator / Wolfe R., Lieberman R.A., Fratello V.J., et al. // Applied Physics Letters. – 1990. – V. 56(5) – P. 426-428.
7. «Simple Micro-Lens with Polymer-Filled Trench in Slab Waveguide» / Tsukamoto K. et al. // Fujitsu Sci. Tech. J. – June 2002. – V. 38, No. 1. – P. 54-63.
8. Emkey W.L. Analysis and Evaluation of Graded-Index Fiber-Lenses / Emkey W.L. and Jack C.A. // J. Lightwave Technol. – Sept. 1987. – V. LT-5, No. 9. – P. 1156-1164.
9. Novel beam expanders and high-power connectors / Yablon A.D., Yan M.F., DiGiovanni D.J., et al. // National Fiber Optic Engineers Conference (NFOEC), Orlando, FL, Sept. 7–11, 2003 : proc. – 2003. – P. 16.

Басіладзе Г.Д. Волоконно-оптичний модуль перемикача каналів на базі епітаксіальної плівки фериту граната / Басіладзе Г.Д., Бержанський В.Н., Долгов О.І. // Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Фізико-математичні науки. – 2011. – Т. 24(63), №2. – С. 104-113.

Експериментально реалізований і досліджений оптичний модуль, здатний працювати у волоконно-оптичному перемикачі каналів. Модуль зібраний з набору чотирьох оптичних волокон і епітаксіальної плівки фериту граната (ЕПФГ), у якому торці волокон зістиковані із вхідним торцем ЕПФГ. Довжина ЕПФГ уздовж шляху поширення світла 3,88 мм, товщина – 12 мкм. ЕПФГ складу $(Bi\ Lu\ Ca)_3(Fe\ Ga)_5O_{12}$ мала магнітну анізотропію типу кутова фаза з полем насичення ≈ 50 Е. Величина фарадеевського обертання в насиченому стані на довжинах хвиль 1,31 і 1,55 мкм при намагнічуванні ЕПФГ полем у напрямку поширення світла склала 270° (69,6°мм⁻¹) і 225° (58,0°мм⁻¹), відповідно. При цьому ступінь поляризації на виході ЕПФГ досягала величини 0,98. Втрати світла в оптичному ланцюзі не перевищували 1,75 дБ.

Ключові слова: магнітооптичний модулятор, магнітооптичний перемикач, епітаксіальна плівка фериту граната.

Basiladze G.D. The fiber-optic module of the channels switch on the basis of the epitaxial film of the ferrite of the garnet / Basiladze G.D., Berzhansky V.N., Dolgov A.I. // Scientific Notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. – Series: Physics and Mathematics Sciences. – 2011 – Vol. 24(63), No.2. – P. 104-113.

The optical module, which is capable to operate in the fiber-optic channel selector switch is experimentally realized and examined. The module is composed of four optical fibers and epitaxial films of ferrite garnet (EFFG) in which edges of the fibers are joined with the set input edge of EFFG. The length of the EFFG along the propagation path of a light is 3.88 mm, the width is 12 μm . The EFFG composed of $(\text{Bi Lu Ca})_3(\text{Fe Ga})_5\text{O}_{12}$ possessed the magnetic anisotropy of the angular phase type and a field of saturation of about 50 Oe. The magnitude of faraday rotation in a saturation of magnetization on the of the wavelengths 1.31 and 1.55 μm at magnetizations of EFFG by the field in the direction of propagation of light was 270° ($69,6^\circ\text{mm}^{-1}$) and 225° ($58,0^\circ\text{mm}^{-1}$), accordingly. Thus the degree of polarization on the output EFFG attained magnitude 0.98. Light losses in optical circuit did not exceed 1.75 dB.

Keywords: magneto-optical modulator, magneto-optical switch, epitaxial film of ferrite of a garnet.

Поступила в редакцию 01.08.2011 г.