

УДК 681.7.068 + 537.622

ЭЛЕКТРО - И МАГНИТООПТИЧЕСКИЕ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ ДЛЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ СВЯЗИ

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

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

На основе литературных данных проанализировано современное состояние разработок в области волоконно-оптических переключателей, базирующихся на не объемных магнитооптических (МО) элементах. Проведено их сравнение с аналогичными устройствами на основе ниобата лития по показателям, характеризующим работу переключателей. Акцентируется внимание на том, что свойственные МО материалам отличительные особенности создают предпосылки для разработки устройств, конкурентоспособных на рынке волоконно-оптических модуляторов и переключателей.

Ключевые слова: волоконно-оптический переключатель, магнитооптическая пленка, активный элемент переключателя.

ВВЕДЕНИЕ

Оптические переключатели являются одними из ключевых элементов волоконно-оптических информационно-телекоммуникационных сетей. Они осуществляют коммутацию оборудования, каналов и потока данных путем прерывания или изменения направления световых потоков в сети. Для этого в существующих сетях используют технологию управления светом, основанную на промежуточном преобразовании светового сигнала в электронный вид. Однако рост объемов передаваемой информации приводит к необходимости все более быстрого управления световыми потоками. Поэтому активно развиваются исследования и разработки, направленные на реализацию технологии непосредственного управления светом без промежуточного преобразования в электронный вид. Создаются волоконно-оптические переключатели и модуляторы, действующие на основе различных физических эффектов, функциональность и эффективность работы которых во многом зависит от свойств используемых материалов. К таким эффектам относятся эффект Поккельса в сегнетоэлектрических материалах и эффект Фарадея в магнитооптических материалах.

В настоящее время наиболее используемыми материалами для построения указанных устройств являются электрооптические (ЭО) материалы [1]. Электрооптические устройства для управления световыми потоками выпускаются серийно [2, 3]. В то время как возможности магнитооптических материалов для модуляции света в силу несовершенства технологии их получения изучены далеко не полностью. В последнее время были синтезированы пленки ферритов гранатов, обладающие достаточными значениями оптической прозрачности и эффекта Фарадея в телекоммуникационном диапазоне длин волн 1270-1652 нм [4]. Это привело к определенной активизации исследований, направленных на выяснение возможностей данных материалов и их конкурентоспособности по сравнению с другими материалами.

Целью данной работы является сравнение параметров существующих электрооптических переключателей и модуляторов, построенных, как правило, на основе сегнетоэлектрических кристаллов, с реальными и прогнозируемыми характеристиками аналогичных магнитооптических устройств на тонких пленках, а также определение путей их дальнейшего совершенствования.

1. ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЕ МОДУЛЯТОРЫ И ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ

1.1. Принцип действия электрооптических устройств

В основе действия электрооптических модуляторов и переключателей лежит линейный электрооптический эффект Поккельса, при котором под действием приложенного к кристаллу электрического поля происходит изменение коэффициента преломления света. Наилучшими электрооптическими характеристиками, реализуемыми в промышленности, обладают кристаллы ниобата лития LiNbO_3 [2] и титанита-цирконата свинца-лантана $(\text{Pb,La})(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ (PLZT) [3].

В качестве примера оптического переключателя на Рис. 1 схематически изображен волноводный переключатель на основе кристалла LiNbO_3 [5]. Активный элемент включает в себя два канальных волновода, которые в области связи расположены друг от друга на расстоянии нескольких длин волн оптического сигнала, а также управляющие этой связью электроды.

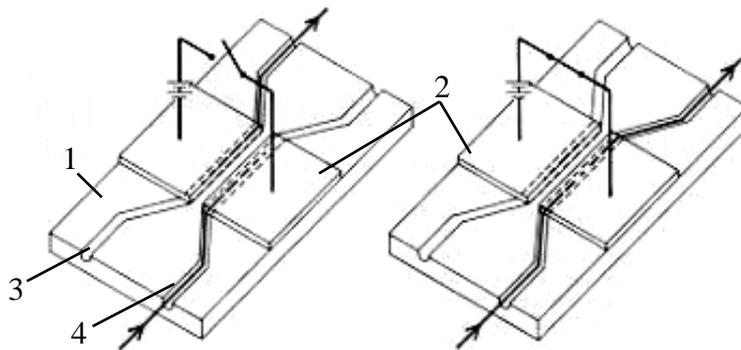


Рис. 1. Активный элемент волноводного электрооптического переключателя на основе кристалла LiNbO_3 , где 1 – монокристаллический LiNbO_3 , 2 – электроды, 3 и 4 – волноводные каналы.

Волноводы переключателя выполняются симметричными, они должны быть максимально близки по своим свойствам. При отсутствии напряжения на электродах оба волновода имеют одну и ту же постоянную распространения и световая волна, введенная в один волновод, переходит в другой. Если к электродам прикладывается напряжение, то в результате эффекта Поккельса происходит изменение показателя преломления LiNbO_3 , меняется постоянная распространения волноводов, что вызывает понижение коэффициента связи и свет выходит из противоположного конца подводящего волновода.

Требуемая для такого переключения величина управляющего напряжения, в общем случае, зависит от электрооптического коэффициента LiNbO_3 с образованными в нем волноводами, электродов, создающих электрическое поле поперечно направлению распространения света, и длины связи волноводов в зоне воздействия электрического поля.

Для создания волноводов на поверхность кристалла LiNbO_3 фотолитографическим методом наносится соответствующий рисунок из тонкой пленки титана. Высокая температура Кюри LiNbO_3 (1100 - 1180 °С) делает его удобным для формирования в нем оптических волноводов с малыми потерями путем осуществления диффузии металлов [6]. Титан при нагревании (~1000 °С) диффундирует в кристалл LiNbO_3 на глубину нескольких микрон. В результате, за счет увеличившихся по сравнению с LiNbO_3 показателей преломления n_e и n_o образуются два волноводных канала в виде направленного ответвителя конфигурации 2 x 2, в котором могут распространяться ТЕ и ТМ волноводные моды. В области связи волноводов, используя методы фотолитографии, напыления и химического осаждения, образуют электроды толщиной от нескольких микрон до 15 мкм [7]. Материал электродов может влиять на величину управляющего напряжения, необходимого для работы переключателя. Обычно используются электроды из аквадага, серебросодержащей пасты, напыленного в вакууме серебра или золота. Торцы кристалла LiNbO_3 полируются для соединения волноводов с оптическими волокнами. Геометрические размеры подобного элемента, изготовленного из заготовки размерами примерно (1 x 7,8 x 20) мм, составляют (1 x 2,5 x 20) мм³ [8].

1.2 Основные характеристики электрооптических устройств

Среди показателей, характеризующих работу переключателей, особенно важным является скорость переключения. В иерархии скоростей переключения в оптических сетях различают обычно четыре уровня: низкие скорости – порядка 10^{-3} с, средние – порядка 10^{-6} с, высокие – порядка 10^{-9} с, очень высокие – порядка 10^{-12} с. Они достаточны для осуществления, соответственно, следующих операций: автоматической конфигурации-реконфигурации, защитного переключения колец или альтернативных маршрутов в сетях, коммутации потоков данных (пакетов), внешней модуляции светового потока потоком бит данных [9].

Важными показателями являются также:

- вносимые коммутатором потери – вызываемое коммутатором ослабление сигнала;
- переходное затухание (перекрестные помехи) коммутатора – отношение мощности сигнала на нужном (скоммутированном) выходе к мощности сигнала на всех остальных выходах;
- поляризационные потери коммутатора (PDL) – ослабление коммутируемого сигнала, вызванное изменениями поляризации на входе.

Кроме перечисленных показателей, существенной характеристикой является потребляемая коммутатором мощность. Целью любой конструкторской разработки волноводного переключателя или модулятора для оптических интегральных схем

является достижение большой полосы пропускания Δf при низкой управляющей мощности P [10].

Скорость переключения. Так как линейный электрооптический эффект в основном обусловлен переходами в электронной подсистеме, то временной отклик изменения показателя преломления приближается к времени релаксации электронной подсистемы ($10^{-13} \div 10^{-14}$ с) [11]. То есть в определенном смысле электрооптический эффект является практически безинерционным. Поэтому на его основе принципиально возможно создание модуляторов и переключателей с быстродействием 10^{-12} с и верхней граничной частотой до сотен гигагерц [10]. Однако в реальных условиях оптическая и модулирующая волны имеют различные скорости распространения, поэтому в модуляторах бегущей волны, обладающих наибольшим быстродействием, необходимо принимать специальные меры по согласованию групповых скоростей световой и модулирующей СВЧ-волны. Если такое согласование не обеспечено, то граничная частота модуляции f_{zp} , обусловленная фазовым рассогласованием волн, определяется формулой $f_{zp} \approx c/\pi\varepsilon^{1/2}l$, где c – скорость света в вакууме; ε – диэлектрическая проницаемость материала оптического волновода, l – длина волновода [12]. На частотах $f < f_{zp}$ емкость системы электродов C определяет ширину полосы модулятора Δf (и, следовательно, время переключения переключателя $T = 1/2\pi \Delta f$, $\Delta f = 1/\pi RC$, где R – сопротивление нагрузки, которое должно быть согласовано с выходным сопротивлением ВЧ-генератора [10].

Быстродействие и ширина полосы модуляторов и переключателей света различных типов, использующих электрооптический эффект, в основном определяются конфигурацией и схемой включения электродов. Принято различать модуляторы с электродами в виде сосредоточенной цепи или передающей линии с согласованными импедансами [10]. Система электродов, используемая в переключателях, построенных подобно представленному выше на Рис. 1, относится к первому типу. Быстродействие таких устройств ограничено характерным временем τ , зависящим от значений R и C цепи. Частота модуляции в таких модуляторах на основе LiNbO_3 , не превышает 2 ГГц. Если же использовать передающую линию бегущей волны, то быстродействие и эффективность модуляции определяются частотой модулирующего сигнала и различием фазовых скоростей оптической и модулирующей волн в модуляторе [10]. Такие модуляторы на основе LiNbO_3 , выпускаемые промышленно [2] обладают шириной полосы порядка 20 ГГц.

Относительно отмечаемых в литературе ограничений по частотным возможностям электрооптических модуляторов на LiNbO_3 следует отметить работу [13]. Согласно ей имеющиеся в продаже современные оптические компоненты хорошо работают на частотах только до 20 ГГц [13]. Скорость переключения выпускаемых на сегодняшний день промышленностью переключателей на LiNbO_3 конфигурации 1x2 [2] составляет порядка 10 нс.

Вносимые потери. Современная технология позволяет формировать в кристалле LiNbO_3 направленные ответвители 2 x 2 с относительно высоким

светопропусканием. Уровень потерь в них не превышает 0,5 дБ/см. Более существенны потери оптической мощности, которые возникают на месте соединения оптического волокна и канального волновода из-за несогласованности параметров волокна и волновода – потери на отражение, а также потери, вызванные несопадением распределений модовых полей в волокнах и канальном волноводе [14]. Потери на отражение в канальном волноводе во многом зависят от способа образования связи между торцами волокна и волновода (т. е. от точности обработки соединяемых торцов, наличия или отсутствия просветляющих покрытий, показателя преломления адгезивного материала и т.п.).

Что касается потерь, вызванных несопадением распределений модовых полей в волокне и канальном волноводе, то расчеты показывают [15], что максимальная эффективность связи между одномодовым оптическим волокном круглого сечения и одномодовым Ti: LiNbO_3 волноводом достигается при совпадении поперечного размера моды канального волновода с полушириной распределения интенсивности поля моды волокна, определенной на уровне половины максимума интенсивности.

Относительно реально достигнутых значений вносимых потерь электрооптических переключателей отметим, что для выпускаемых промышленно современных переключателей конфигурации 1 x 2 на LiNbO_3 [2] и PLZT ($(\text{Pb},\text{La})(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$) [3] этот параметр составляет величину около 3 и 5 дБ, соответственно.

Обращает на себя внимание отмеченная в работе [7] восприимчивость кристалла LiNbO_3 к фоторефрактивному оптическому повреждению на длинах волн меньше 1 мкм. Эта восприимчивость, как правило, незначительна для оптической мощности менее 100 мВт.

Потребляемая мощность. Потребляемая электрооптическим коммутатором мощность P зависит от прилагаемого к электродам рабочего напряжения U или, как принято для модуляторов, полуволнового напряжения $U_{1/2}$. Под полуволновым напряжением понимается минимальное напряжение, необходимое для изменения коэффициента пропускания модулятора от минимального до максимального значения или изменения фазовой задержки $\Delta\varphi$ на π радиан [11]. Полуволновые напряжения прямо пропорциональны длине волны света и обратно пропорциональны электрооптическому коэффициенту. Модулятор может быть представлен в виде конденсатора емкостью C , включенного в колебательный контур, ширина Δf полосы пропускания которого удовлетворяет соотношению $\pi RC\Delta f = 1$. Тогда требуемая управляющая мощность равна $P = U^2/2R = \pi C U^2 \Delta f / 2$ [16]. Часть мощности рассеивается в активной области пространства модулятора или переключателя и ее величина зависит от конструкции его рабочих элементов. Один из возможных путей минимизации значения $U_{1/2}l$ – это оптимизация геометрического параметра d/g [10]. Для получения оптимальной конструкции модулятора (переключателя) необходимо оптимизировать интеграл перекрытия полей g в зависимости от ширины межэлектродного зазора d , ширины распределения волноводной моды, используемой конфигурации электродов (определяющей компоненты электрического поля E_{\parallel} и E_{\perp}) и относительных размеров электродов и оптических волноводов.

В случае модуляторов потребляемая электрическая мощность увеличивается с увеличением частоты модуляции [17]. Поэтому характерным показателем является потребляемая мощность на единицу ширины полосы модулятора $P/\Delta f$. Во многих системах величина удельной мощности $(P/\Delta f)_2$ определяет одну из главных статей эксплуатационных расходов, поэтому ее можно использовать как критерий качества модуляторов при определении их применимости для конкретных целей [11].

Верхний частотный предел определяется допустимой мощностью рассеяния в цепи управления, которая равняется $P = 0,5CU^2\Delta f$ [18].

Согласно работе [17] мощность, потребляемую при работе оптических переключателей, работающих при больших скоростях переключения сигналов можно оценить во многом сходным способом, как это делают в случае оптических модуляторов. Поэтому в этом случае $P/\Delta f$ является полезным критерием. Однако, если переключение осуществляется при сравнительно низких скоростях, более существенной величиной является мощность, затрачиваемая для удержания переключателя в определенном рабочем положении. В идеале переключатель может потреблять мощность только во время смены состояний; мощность, затрачиваемая в нем на поддержание состояния, должна быть незначительной.

Для электрооптических переключателей необходимо присутствие электрического поля для поддержания хотя бы одного положения [17]. В данном случае исключение составляют, например, переключающие элементы на основе электрооптического эффекта, выполненные из аморфного материала и обеспечивающие сохранение стабильных состояний переключения без непрерывного подвода энергии, однако их время переключения имеет довольно высокое значение, поскольку переходные процессы между стабильными состояниями занимают интервалы времени в диапазоне миллисекунд [19].

Потребляемая мощность промышленно выпускаемых переключателей на LiNbO_3 [2] на частоте 1 МГц составляет ~ 2 мВт при напряжении, подаваемом на электроды 5 В. Аналогичные характеристики переключателя на PLZT – до 2 мВт на частоте 1 МГц и до 20 мВт на частоте 10 МГц при переключающем напряжении 10 В [3].

Переходное затухание в зависимости от длины волны. Планарные волноводные схемы (PLC) электрооптических переключателей могут быть довольно быстродействующими (~ 10 нс) и достаточно надежными [20]. Однако они имеют спектральную зависимость и относительно высокие перекрестные помехи. Современные промышленно выпускаемые переключатели на основе LiNbO_3 (см., например [2]) являются одноволновыми, т.е. рассчитаны для работы на одной из заданных длин волн спектрального диапазона, используемого в телекоммуникационных волоконно-оптических сетях. Применяемые в сетях связи полупроводниковые лазерные диоды, предназначенные для работы на определенной длине волны, на самом деле могут иметь некоторое отклонение от заявленного номинала (центральной длины волны). Кроме того, возможны температурные колебания окружающей среды и в системе стабилизации температуры самого лазера, что приводит к зависимости [21] длины волны лазера от температуры. Колебания рабочей длины волны могут ухудшить показатель перекрестных помех переключателя. Причиной этого является изменение коэффициента

межволноводной связи, вызванное изменением степени перекрытия полей волноводных мод в зоне связи волноводов.

Поляризационные потери. В общем случае электрооптические переключатели на основе направленных ответвителей чувствительны к поляризации световых волн [10]. Как известно, если электрическое поле приложено вдоль выбранного направления (например, ось z), показатель преломления n_z не изменится, а показатели преломления в плоскости, перпендикулярной оси z , изменяются на величину Δn , пропорциональную электрическому полю E_z (например, $n_x = n + \Delta n$, $n_y = n - \Delta n$) [18]. Величина линейного электрооптического эффекта определяется выражением $\Delta n = rE_z n^3/2$, где r – электрооптический коэффициент, n – показатель преломления материала в отсутствии поля. Поэтому изменение направления поляризации входного светового пучка будет приводить к изменению требуемого фазового согласования между оптическими полями в связанных волноводах, необходимого для полной перекачки света в соседний волновод.

Выбором специальной системы электродов либо соответствующей ориентации монокристаллической подложки ниобата лития можно создать переключатели и модуляторы, не чувствительные к поляризации [17]. В работе [22] отмечено, что их поляризационная зависимость, может быть снижена только ценой повышения управляющего электрического напряжения, которое в свою очередь ограничивает скорость переключения. Так, например, если переключателю света компании «Eospace» [2], рассчитанному на работу с линейно поляризованным светом, требуется напряжение 5 В, то рабочее напряжение переключателя, рассчитанного на работу в поляризационно-независимом режиме, составляет уже 15 В.

2. МАГНИТООПТИЧЕСКИЕ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ И МОДУЛЯТОРЫ

2.1. Принцип действия магнитооптических устройств

Коммутация светового потока в МО переключателях, в отличие от ЭО переключателя на LiNbO_3 , не происходит непосредственно в зоне воздействия управляющего поля. Эту функцию осуществляют дополнительные оптические устройства, примыкающие к магнитоактивному элементу. Последний осуществляет лишь поляризационную модуляцию света при воздействии на него управляющего магнитного поля. Наиболее часто используемыми дополнительными оптическими устройствами являются поляризационно-селективные разветвители [23-25].

Поляризационная модуляция в МО элементе происходит благодаря эффекту Фарадея при приложении к нему переменного магнитного поля с амплитудой H , когда его вектор или его компонента параллельны распространению света в МО элементе. Величину вращения плоскости поляризации света в градусах для приложенного магнитного поля H формально можно записать как $\theta = \chi_M(\theta_F/4\pi M_S)Hl$, где χ_M – магнитооптическая восприимчивость, M_S – намагничивание насыщения, l – длина пути света в среде, θ_F – удельное фарадеевское вращение [11].

В [23, 26], рассмотрен гипотетический вариант полностью волоконно-оптического переключателя, (см. Рис. 2), где в качестве МО вращателя предлагается использовать магнитооптическое монокристаллическое волокно из феррита граната

иттрия (YIG). Сплавные поляризационные разветвители в этой схеме конфигурации 1 x 2 разделяют и объединяют поступающие на их входы световые потоки с ортогонально ориентированными плоскостями поляризации.

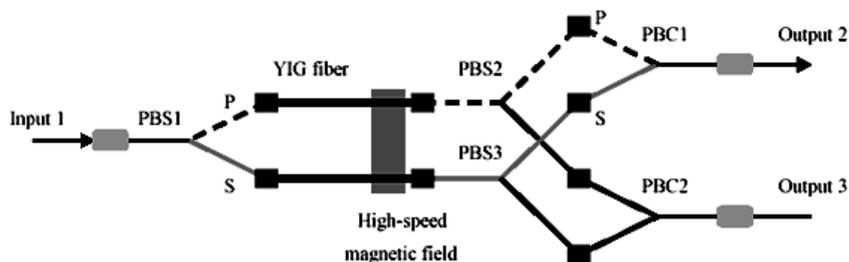


Рис. 2. Оптическая схема переключателя на основе магнитооптических монокристаллических волокон и поляризационных разветвителей (состояние $H=0$).

Поступающий во входной порт 1 (см. Рис. 2) поляризационно-селективного разветвителя (делителя) PBS1 световой сигнал расщепляется в нем на ортогонально поляризованные S и P составляющие. Эти сигналы, проходя через магнитооптические волокна, попадают на входы делителей PBS2 и PBS3, соответственно. Когда магнитное поле выключено, сигналы P и S направляются делителями PBS2 и PBS3 в два порта поляризационного разветвителя (объединителя) PBC1, где они объединяются и выходят через порт 2 оптической схемы переключателя. При включении магнитного поля, в результате поворота на 90° плоскостей поляризации, проходящих через магнитооптические волокна световых сигналов, они направляются делителями PBS2 и PBS3 в два порта объединителя PBC2, где они объединяются и выходят через порт 3 оптической схемы переключателя.

В работе [24] в качестве МО вращателей использованы выращенные на подложке из GGG толщиной 500 мкм эпитаксиальные пленки феррита граната (ЭПФГ) $[Bi_{1,1} Tb_{1,9}][Fe_{4,25} Ga_{0,75}]O_{12}$ толщиной 330 мкм, имеющие лабиринтную доменную структуру. Входные и выходные оптические волокна ориентированы ортогонально к поверхностям пленок.

В работе [27] нами предложена конструкция переключателя, на основе планарно-ориентированных магнитоактивных пленок с торцевым подсоединением одномодовых оптических волокон. Такая схема переключателя (см. Рис. 3) работает аналогично, показанной на Рис. 2. Следует отметить, что в отличие от магнитооптических монокристаллических волокон, технология получения магнитооптических монокристаллических пленок является промышленно освоенной и они доступны для разработчиков переключателей.

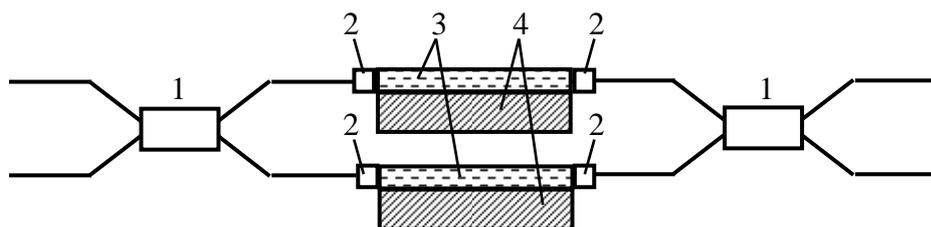


Рис. 3. Схема переключателя 2 x 2 с планарной ориентацией ЭПФГ в оптической цепи, где 1 – одномодовый поляризационно-селективный разветвитель 2x2, 2 – волоконная линза, 3 – МО пленка, 4 – подложка.

Для исполнения переключателя в варианте конфигурации 1 x 2 входной разветвитель 2 x 2 заменяется разветвителем 1 x 2 [24, 28]. Следует отметить, что подобная схема может работать с одним МО элементом в качестве вращателя для обоих плеч. Для исследования указанной конструкции нами в работе [29] был создан оптический модуль, где данная схема была реализована на стадии конструирования узла соединения входных волокон с пленкой.

В ряду магнитооптических материалов существенный интерес представляют ЭПФГ с плоскостной или близкой к ней магнитной анизотропией, имеющие толщину магнитоактивного слоя, согласующегося с диаметром стандартного одномодового волокна (≈ 9 мкм). Анализ литературы показывает, что возможности таких пленок применительно к оптическим переключателям не достаточно изучены. Пленки с анизотропией типа «легкая плоскость» обладают важным преимуществом – малыми полями перемагничивания, что делает их перспективными для создания переключателей с относительно малым энергопотреблением.

1.2. Основные характеристики тонкопленочных магнитооптических устройств

Скорость переключения. Экспериментальные данные по скоростным характеристикам волоконно-оптических устройств, где для модуляции плоскости поляризации использованы МО пленки, представлены в работах [24, 30]. В [24] МО вращатели работали за счет процессов смещения доменов при перемагничивании пленки. Время переключения, измеренное по спаданию оптической мощности сигнала при ширине модулирующего импульса 10 кГц, составило 2 мкс. В качестве источника магнитного поля использовался соленоид. В работе [30] в качестве модулятора опробовано устройство, представляющее собой конструкцию жестко связанных с торцом ЭПФГ оптических волокон [29]. Модуляция глубиной 98 % осуществлялась на частоте 120 кГц. Время нарастания и гашения оптического сигнала на выходе анализатора поляризации составляло 4 мкс. В качестве источника магнитного поля использовались катушки Гельмгольца.

Следует отметить, что приведенные в работах [24, 30] показатели быстродействия не могут характеризовать истинный скоростной потенциал устройств с применением МО элементов, так как быстродействие в этом случае ограничивалось индуктивностью источника магнитного поля. В большей мере этот

потенциал характеризуют показатели быстродействия, приведенные в работах [31, 32], где при частоте перемагничивания 1,8 ГГц наблюдалась модуляция амплитуды линейно поляризованного света на выходе анализатора с интервалом времени между максимумами около 300 пикосекунд. Для достижения высоких скоростей переключения необходимо добиваться минимально возможного значения постоянной времени электрической цепи управления полем перемагничивания МО элемента. В работах [31, 32] для этого использован индуктор в виде микрополосковой передающей линии, по которой пропускали синусоидальный ток амплитудой около 74 мА, создающий в плоскости пленки в направлении распространения света магнитное поле с расчетной напряженностью, примерно, 0,3 мТ. В качестве согласованной на 50 Ом линии передачи использована полоска индия толщиной 100 мкм, нанесенная через 100 нм адгезивный слой титана, на поверхность Bi - ЖИГ пленки. При приложении в плоскости пленки статического магнитного поля напряженностью, например 52 мТ, направление которого перпендикулярно переменному магнитному полю и направлению распространения света, регистрировалось время нарастания импульса светового сигнала 343 пс при времени нарастания импульса тока в передающей микрополосковой линии 320 пс.

Что касается скоростных возможностей самого МО материала, то в качестве возможного (фундаментального) препятствия на пути достижения сверхвысоких скоростей переключения может оказаться явление прецессии вектора намагниченности, которое возникает при перемагничивании МО элемента в импульсных магнитных полях длительностью $\sim 10^{-9}$ секунд. Продолжительность этого процесса связана с временем спиновой прецессии или спин-решеточной релаксации. Хотя практические вопросы, связанные с сверхбыстрым импульсным перемагничиванием ($\tau < 1$ нс) и влиянием на него явления прецессии изучены не достаточно, исходя из результатов работ [31, 32], можно рассчитывать на высокое быстродействие МО переключателей. По крайней мере, можно ожидать результата, не уступающего достигнутому [2] для промышленных образцов ЭО переключателей времени 10 нс. В качестве дополнительного аргумента могут служить расчетные данные из работы [33], где показано, что при сильном эффективном поле плоскостной анизотропии колебания намагниченности почти полностью демпфируются и достижимо время намагничивания $\sim 0,15 - 0,2$ нс, при амплитуде намагничивающего импульса $H_m \sim 20 - 40$ Э.

Вносимые потери. Эта характеристика исследовалась в работе [24], при исследовании конструкции с ортогональным соединением волокон с пленкой. Вносимые потери такого переключателя при общей толщине вращателя поляризации ≈ 880 мкм (пленка 330 мкм + подложка 500 мкм) составили 4,8 дБ. Из-за отсутствия коллимирующей оптики, излишние потери в такой конструкции могли быть вызваны расхождением пучка света при прохождении расстояния (≈ 880 мкм) между волокнами.

Ниже приведен результат выполненного нами оценочного расчета вносимых потерь в переключателе, построенном на принципе торцевого соединения волокон с пленкой (Рис. 3). Значения общих вносимых потерь и составляющих видов потерь для трех вариантов согласования МО пленки с оптическими волокнами приведены в

Таблице 1. Расчеты проведены для случая, когда длина оптического пути в МО пленке l_{EFGF} составляет 0,5 мм при удельном затухании света на длине волны 1310 нм $\alpha_{EFGF} = 0,1$ дБ/мм. Рассмотрены следующие варианты контактной среды при соединении волокон с пленкой: воздух ($n = 1,0$), эпоксидный компаунд ($n = 1,5$) и среда с оптимальным показателем преломления ($n = 1,8$).

В основе полученных результатов лежат также следующие положения. Вносимые потери представленных на рынке волоконно-оптических поляризационно-селективных разветвителей 2 x 2 (например, 2 x 2 Polarization Beam Combiner/Splitter от Opto-Link Corporation Ltd.) категории Grade P имеют типичные значения $\alpha_{PBS} = 0,6$ дБ [34]. Примеры согласования волокон и пленки с помощью соответственно, градиентных волоконных и планарных линз показаны на Рис. 4 - 5. Линза, установленная на конце возбуждающего волокна, расширяет поле моды одновременно коллимируя вводимый в МО пленку пучок света. За счет этого расходимость пучка света существенно уменьшается. Линза, установленная на приемном волокне обратно преобразует поле до размера фундаментальной моды одномодового волокна. Аналогично работают планарные микролинзы.

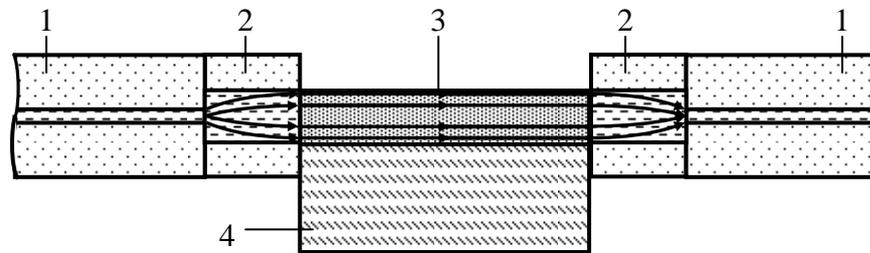


Рис. 4. Согласование одномодовых волокон с торцом МО пленки с помощью коллиматоров, выполненных в виде градиентных волоконных линз, где 1 – одномодовое волокно; 2 – волоконная линза; 3 – МО пленка, толщиной $h = 41,6$ мкм, длиной вдоль направления распространения света $l = 0,5$ мм; 4 – подложка.

По данным [35] волоконная линза на входе расширяет поле моды светового пучка до значения 41,6 мкм. Без учета потерь на френелевское отражение входная линза и линза на выходе вносят в сумме потери 0,2 дБ. Поэтому в расчете принимается, что входное и выходное волокна с градиентными микро линзами имеют вносимые потери $\alpha_{IC} = \alpha_{OC} = 0,1$ дБ.

Планарные микролинзы по данным работы [36] вносят по отдельности дополнительные оптические потери $\approx 0,5$ дБ. В связи с этим принимаем, что дополнительные потери, вносимые входной и выходной планарными микролинзами, соответственно α_{IC} и α_{OC} составляют по 0,5 дБ.

Показатель преломления сердцевинны n_c планарной линзы по данным [37] может варьироваться от 1,4513 до 1,4593. Для среднего значения этого показателя преломления в случае воздушного зазора между линзой и пленкой френелевские

потери при передаче света из планарной линзы в пленку или из пленки в линзу составят $\alpha_{FR} = 0,81$ дБ. При заполнении зазоров эпоксидным клеем Френелевские потери составят $\alpha_{FR} = 0,159$ дБ.

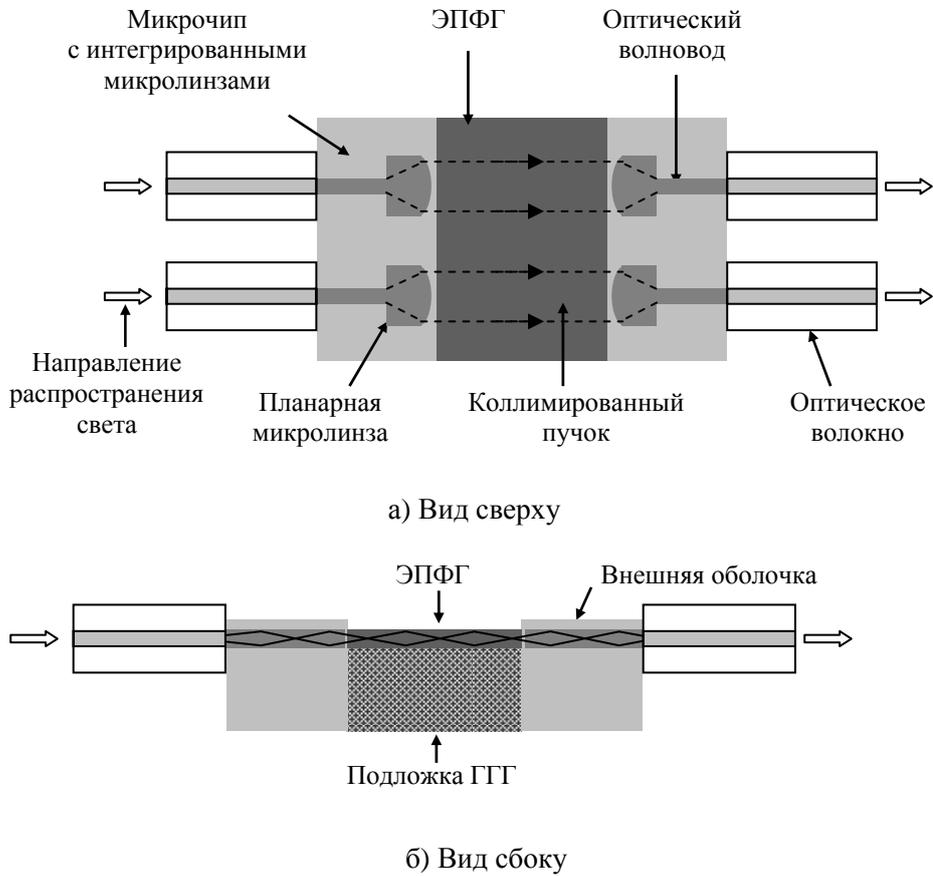


Рис. 5. Подключение оптических волокон к ЭПФГ с помощью планарных линз.

В [37] приводятся данные о значении оптических потерь в планарном волноводе длиной 80 мм с планарными микролинзами на входе и выходе. При передаче света через такую систему оптические потери составляли 3,5 дБ. Если учесть, что суммарные потери в самих линзах ~ 1 дБ, то оптические потери, приходящиеся на поглощение в материале волновода и расширение светового пучка в нем, составляли $2,5/80 \approx 0,032$ дБ/мм. С учетом этого для расчета потерь в МО переключателе с планарными линзами принято допущение, что оптические потери при передаче света между двумя планарными линзами через ЭПФГ длиной 0,5 мм (α_{OL}), за счет расширения пучка света, без учета френелевских потерь и дополнительных потерь в планарных микролинзах, не превысят 0,1 дБ.

Таблица 1

Вносимые потери для трех конструкций планарного магнитооптического переключателя на длине волны света 1310 нм

Вид потерь	Значения оптического затухания для различных случаев согласования ОВ с ЭПФГ					
	без коллиматоров ($h_{ЭПФГ} \approx 9$ мкм)		с коллиматорами в виде волоконных линз ($h_{ЭПФГ} \approx 41$ мкм)		с коллиматорами в виде планарных линз ($h_{ЭПФГ} \approx 9$ мкм)	
Потери во входном поляризационно-селективном разветвителе (α_{PBS1})	0,6 дБ		0,6 дБ		0,6 дБ	
Потери на френелевское отражение при вводе и выводе света из пленки при различных значениях показателя преломления среды n в зазорах ($2 \cdot \alpha_{FR}$)	$n=1,0$	1,64 дБ	$n=1,0$	1,64 дБ	$n=1,0$	1,62 дБ
	$n=1,5$	0,32 дБ	$n=1,5$	0,32 дБ	$n=1,5$	0,32 дБ
	$n=1,8$	0,17 дБ	$n=1,8$	0,17 дБ	$n=1,8$	0,18 дБ
Потери во входном соединителе ОВ с ЭПФГ (α_{IC})	0 дБ		0,1 дБ		0,5 дБ	
Потери, обусловленные несоответствием геометрических размеров входного пучка света и пленки (α_{IL})	0 дБ		0 дБ		0 дБ	
Оптические потери в пленке ($l_{EFGF} \cdot \alpha_{EFGF}$)	$\approx 0,05$ дБ		$\approx 0,05$ дБ		$\approx 0,05$ дБ	
Потери в выходном соединителе ОВ с ЭПФГ (α_{OC})	0		0,1		0,5	
Потери, обусловленные расширением выходного пучка света на выходе пленки (α_{OL})	8 дБ		0,1 дБ		0,1 дБ	
Потери в выходном поляризационно-селективном разветвителе (α_{PBS2})	0,6 дБ		0,6 дБ		0,6 дБ	
Суммарные потери в переключателе при различных значениях показателя преломления среды n в зазорах (α_{MOSW})	$n = 1,0$	10,90 дБ	$n = 1,0$	3,19 дБ	$n = 1,0$	3,97 дБ
	$n = 1,5$	9,57 дБ	$n = 1,5$	1,87 дБ	$n = 1,5$	2,67 дБ
	$n = 1,8$	9,42 дБ	$n = 1,8$	1,72 дБ	$n = 1,8$	2,54 дБ

Таким образом, расчет показывает, что лучший результат по вносимым оптическим потерям получается для варианта конструкции переключателя, применяющего в качестве согласующих элементов градиентные микролинзы. Ожидаемые для этого случая, минимальные вносимые оптические потери переключателя составляют 2,54 дБ.

Потребляемая мощность. В работе [11] приводится выражение удельной мощности на единицу ширины полосы для МО модулятора на основе объемного магнитоактивного элемента. В системе единиц СГС оно записано в виде

$$P/\Delta f = (1/8)(\chi_M - 1)H^2 V_M, \quad (1)$$

где V_M – взаимодействующий со светом объем магнитоактивного элемента.

Для случая, когда фарадеевское вращение на один радиан ($\theta = 57^\circ$) соответствует фазовому сдвигу $\Delta\varphi$ на два радиана между левой и правой круговыми поляризациями оно приобретает вид

$$(P/\Delta f)_2 = 4,1 \cdot 10^4 S^2 [(\chi_M - 1)/\chi_M^2] (4\pi M_S/\theta_F)^2 (\lambda_0/n), \text{ мВт/МГц}, \quad (2)$$

где S – фактор надежности, определяемый отношением поперечного размера оптического канала в активном материале и светового пучка в нем, n – показатель преломления материала.

Таким образом, для объемных МО модуляторов удельная мощность растет только как первая степень λ_0 в отличие от зависимости λ_0^3 для объемного ЭО устройства [11]. Для волноводного устройства, в случае, когда, a не зависит от l (планарный волновод), а b ограничено дифракцией, выражение для удельной мощности приобретает вид [11]

$$(P/\Delta f)_2 = 4,1 \cdot 10^4 S [(\chi_M - 1)/\chi_M^2] (4\pi M_S/\theta_F)^2 a \sqrt{2\lambda_0/nl} \quad (3)$$

В [11] дана примерная оценка нижней границы удельной мощности для волноводного модулятора на основе МО пленки толщиной $h = a = 3,5$ мкм, $\theta_F = 208^\circ \text{см}^{-1}$ и $l = 6$ мм. При параметрах $4\pi M_S = 600$ Гс и $\chi_M \sim 50$, ожидаемая удельная энергия составляет всего лишь $24/\xi$ мкВт/МГц, где ξ – фактор перекрытия приложенного магнитного и оптического полей.

В работе [38] общая потребляемая мощность МО модулятора выражена в виде $P = 0,5 \omega L I^2$, где L – индуктивность провода, I – ток, ω – круговая частота модуляции для данного устройства.

Из практических результатов отметим работу [31], где в модуляторе использовалась пленка состава $(Y_{0,6}Bi_{0,4}LuPr)_3(FeGa)_5O_{12}$, толщиной 4,5 мкм, которая обладала намагниченностью насыщения ($\mu_0 M_S$) равной 9 мТ и протяженностью в направлении распространения света в плоскости 60 мкм. Продемонстрирована перестраиваемая работа МО модулятора в диапазоне частот от 1 МГц до 1,8 ГГц при управляющей микроволновой мощности 34 мВ. При этом амплитуда синусоидального тока сохранялась постоянной на уровне 74 мА, что соответствовало напряженности магнитного поля в центре МО области $\sim 0,3$ мТ. Из приведенных данных следует, что в данном случае удельная потребляемая мощность составляет довольно низкую величину – около 20 мкВт/МГц.

В работе [24] пленку перемагничивали с помощью соленоида, через который пропускался ток 5А, чтобы создавать магнитное поле напряженностью 160 Э. Для исследованного в этой работе переключателя на основе МО пленки так же как и для модулятора из работы [30] показатель $(P/\Delta f)$ не может быть удовлетворительным, поскольку в качестве индуктора магнитного поля использованы относительно большие катушки соленоида, с крайне малыми значениями объемов перекрытия.

Переходное затухание в зависимости от длины волны. Спектральная зависимость коэффициента Фарадея МО материала, используемого в переключателе, в общем случае может приводить к изменениям величины переходного затухания при отклонениях длины волны света от заданного значения. Степень этого изменения будет определяться соответствующим отклонением угла

поворота плоскости поляризации на выходе магнитоактивного элемента, зависящим от спектральной чувствительности коэффициента Фарадея используемого материала. В результате параметр перекрестных помех может быть ухудшен из-за появления или же увеличения доли ортогональной составляющей вектора поляризации на входе поляризационно-селективного разветвителя.

В нашей работе [4] приведены теоретические значения переходного затухания для двух переключателей, предназначенных для работы на длинах волн, соответственно, 1310 нм и 1550 нм. Расчет произведен для случая использования в качестве магнитоактивного элемента переключателя МО пленки состава $(\text{Bi}_{1,73}\text{Lu}_{1,24}\text{Ca}_{0,03})(\text{Fe}_{3,82}\text{Ga}_{1,15}\text{V}_{0,03})\text{O}_{12}$ с использованием снятой для нее спектральной характеристики коэффициента Фарадея в области длин волн 1270 - 1625 нм. При отклонениях длины волны в волоконной сети на величину $\pm 3\%$ (40 нм) переходное затухание переключателя не опускается ниже ~ 22 дБ для $\lambda = 1310$ нм и 27 дБ для $\lambda = 1550$ нм.

Экспериментальное значение переходного затухания, полученное на переключателе, реализованном в работе [24], составило 20 дБ.

Что касается перспектив создания спектрально независимых оптических переключателей или модуляторов на основе МО материала, то обнадеживающими выглядят результаты, представленные в работах [39, 40]. В работе [39] продемонстрирована возможность получения МО материала с практически независимым от длины волны коэффициентом фарадеевского вращения в диапазоне длин волн 1500 - 1625 нм. В работе [40] представлено техническое решение по устройству индуктора магнитного поля, позволяющего устранить влияние спектральной зависимости при работе переключателя одновременно на нескольких длинах волн.

Поляризационные потери. В общем случае работа оптического переключателя на основе эффекта Фарадея зависит от состояния поляризации света на входе в волокно. Одним из условий правильной работы переключателя является строго фиксированная ориентация плоскости поляризации коммутируемого излучения. В случае, если входное волокно является, к примеру, поляризационным с ортогональными осями двулучепреломления, то при несовпадении плоскости поляризации света с одной из осей двулучепреломления, состояние поляризации на входе МО элемента не обязательно окажется плоско поляризованным и соответствующим условию правильной работы МО элемента. Поэтому говорить о соблюдении необходимого для нормальной работы переключателя требования 45 градусного угла поворота плоскости поляризации на выходе МО элемента проблематично. Однако при определенном устройстве оптической схемы переключателя, подобной Рис. 3, этот недостаток может быть устранен. Например, посредством установки на входе поляризационно-селективного разветвителя, входные порты которого выполнены из обычного телекоммуникационного волокна (SMF-28) без деполаризующих свет механических напряжений.

3. ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ПРЕИМУЩЕСТВА МО ТЕХНОЛОГИЙ

1. МО элемент, в том числе в волноводном исполнении, осуществляет вращение плоскости поляризации света, распространяющегося в нем вдоль приложенного внешнего магнитного поля. Важным является изменение направления вращения при изменении направления распространения света на противоположное или при изменении направления намагничивающего поля на противоположное. Линейная в определенном диапазоне намагничивающих полей зависимость угла вращения от напряженности магнитного поля делает МО элемент привлекательным для использования в оптических цепях, работающих с модулированными по поляризации оптическими сигналами. Необычные магнитооптические свойства V_i -замещенных феррит-гранатов позволяют модулировать поляризацию и интенсивность поляризованного света в наносекундном масштабе времени [41].

2. Вторым несомненным преимуществом является возможность реализации переключателя, который не требует подачи энергии для поддержания его в коммутированном состоянии [19]. Таким преимуществом из разработанных на сегодняшний день переключателей обладают, например, устройства, использующие MEMS-технологии. Но они обладают сравнительно небольшой скоростью срабатывания (миллисекунды). Поэтому МО переключатели могут оказаться более подходящими для систем, требующих более быстрого переключения, особенно в тех случаях, когда ограничены возможности по энергопотреблению.

К энергетическим преимуществам также можно отнести потенциально менее энергоемкую систему управления МО переключателя, основанную на использовании пленок с плоскостной магнитной анизотропией, не требующих приложения значительных управляющих полей.

3. Привлекательной стороной МО технологии является возможность создания материала с спектрально независимым фарадеевским вращением в телекоммуникационном диапазоне длин волн (1500 - 1625 нм) [39]. На основе таких материалов могут быть построены спектрально независимые коммутирующие устройства для волоконно-оптических сетей. Кроме того, существует возможность устранения спектральной зависимости МО переключателя с помощью индуктора магнитного поля специальной конфигурации [40].

Проблема не зависящего от длины волны переключения света в настоящее время на практике может быть решена только для небольших скоростей переключения (0,4 - 0,6 миллисекунд) при использовании MEMS-технологий [42] или устройств на основе жидких кристаллов [43].

4. В последнее время активно развивается технология магнитофотонных кристаллов, позволяющих значительно усилить величину удельного Фарадеевского вращения. Магнитофотонные кристаллы при нанесении их на торцы оптических волокон могут быть эффективно использованы для модуляции поляризации и переключения света. Как показывают расчеты [44], для работы на длине волны 1550 нм с вращением Фарадея $\pm 45^\circ$ магнитофотонный кристалл должен иметь 52 слоя общей толщиной 11,29 мкм. Реализация такой структуры на торце, например

многомодового световода, образующего коллиматор на выходе одномодового волокна, позволит создать МО миниатюрное устройство, построенное по схеме подобной представленной на Рис. 3.

5. Важно отметить, что в отличие от волноводных устройств на основе LiNbO_3 , где ключевыми элементами являются каналные волноводы, образованные на поверхности кристалла, оптический переключатель на основе МО пленки работает в одномерном волноводном режиме. Это не требует обеспечения точных величин волноводных параметров, которые достигаются с применением дорогостоящего технологического оборудования в интегральной оптике [11]. Поэтому конструкции на основе МО пленок могут оказаться более технологичными и менее затратными при производстве.

6. Касаясь экономических аспектов сравнения устройств на основе LiNbO_3 и МО пленок, отметим следующее. Одним из главных факторов, предопределивших более успешное развитие устройств на основе LiNbO_3 , являлся более высокий уровень развития технологии и дешевизна производства этого кристалла по сравнению с подложечным материалом $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ (GGG), необходимым для синтеза пленок ферритов гранатов. И на сегодняшний день GGG является более дорогостоящим материалом. Так по данным американской компании «МТИ Corporation» [45] стоимость круглых трехдюймовых пластин LiNbO_3 и GGG толщиной 0,5 мм составляют соответственно 165 и 745 долларов США. Однако если сопоставить расход этих материалов на один переключатель, то разница затрат на основное сырье не выглядит для МО элементов столь проигрышной. Так цена заготовки для создания ЭО элемента (размером 20 мм x 3 мм [8]) и МО элемента (размером 5 мм x 3,5 мм [29]) составляет, соответственно, 2,17 и 2,86 долл. США. Поэтому сырьевой фактор уже нельзя рассматривать, как причину, которая способна сдерживать развитие магнитооптических переключающих устройств для волоконных сетей связи и передачи информации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ волоконно-оптических переключателей, использующих эффект Поккельса в ниобате лития и эффект Фарадея в пленке феррита граната показывает, что по основным показателям, характеризующим работу волоконно-оптических модуляторов и переключателей, устройства на основе пленочных МО материалов не уступают, а в некоторых случаях и превосходят электрооптические аналоги. МО материалы обладают рядом особенностей и свойств, реализация которых в таких устройствах способна повысить их конкурентоспособность, наделяя их дополнительными функциями и расширяя тем самым область применений.

Среди перспективных направлений разработок тонкопленочных коммутационных магнитооптических устройств можно выделить спектрально-независимые модуляторы плоскости поляризации и быстродействующие переключатели света, не требующие затрат энергии для поддержания устройств в коммутированном состоянии.

Список литературы

1. A Gigahertz Surface Magneto-Plasmon Optical Modulator / Kenneth J. Chau, Scott E. Irvine, and Abdulkhakem Y. Elezzabi, // *IEEE J. of Quantum Electronics*, – 2004. – Vol. 40, No 5. – P. 571–579.
2. Custom high-speed lithium niobate electro-optic switches [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.eospace.com/pdf/EOSPACE-custom-optical-switch-2009.pdf, свободный.
3. The fastest and most power-efficient optical switches [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.eiphotonics.com, свободный.
4. Басиладзе Г. Д. Влияние спектральной зависимости коэффициента Фарадея на характеристики излучения, прошедшего планарный магнитоактивный элемент / Басиладзе Г. Д., Бержанский В. Н., Долгов А. И. // *Ученые записки Таврического национального университета имени В. И. Вернадского. Серия «Физико-математические науки»*. – 2012. – Т. 25(64), № 1. – С. 160–169.
5. Rowell J. M. Photonic materials / Rowell J. M. // *Scientific American*. – 1986. – Vol. 255, No 4. – P. 146–157.
6. Schmidt R. V. Metal-diffused optical waveguides in LiNbO₃ / Schmidt R. V., Kaminow I. P. // *Appl. Phys. Lett.* – 1974. – Vol. 25, No 8. – P. 458–460.
7. A review of lithium niobate modulators for fiber-optic communications systems / Wooten E. L., Kissa K. M., Yi-Yan A. et al. // *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*. – 2000. – Vol. 6, No 1. – P. 69–82.
8. Runde D. Mode-selective coupler for wavelength multiplexing using LiNbO₃:Ti optical waveguides / Runde D., Breuer S., Kip D. // *Cent. Eur. J. Phys.* – 2008. – Vol. 6, No 3. – P. 588–592.
9. Волоконно-оптическая техника: Современное состояние и перспективы : сб. ст. / под ред. Дмитриева С. А., Слепова Н. Н. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : АО "ВОТ", 2005. – 576 с.
10. Семенов А. С. Интегральная оптика для систем передачи и обработки информации / Семенов А. С., Смирнов В. Л., Шмалько А. В. – М. : Радио и связь, 1990. – 224 с.
11. Интегральная оптика / ред. Тамир Т.; пер. Сычугов В. А., Шипилов К. Ф. – М. : Мир, 1978. – 344 с.
12. Кондиленко И. И. Интегральные электрооптические модуляторы света / Кондиленко И. И., Коротков П. А., Фелинский Г. С. // *Письма в ЖТФ*. – 1980. – Т. 6, вып. 2. – С. 60–77.
13. Recent progress of LiNbO₃ based electrooptic modulators with non return to zero (NRZ) coding in high speed photonic networks / Abd El-Naser A. Mohamed, Mohamed A. Metawe'e Ahmed, Nabih Zaki Rashed, Amira M. Bendary // *Intern. J. Inform. Commun. Technol. Res.* – 2011. – Vol. 1, No 2. – P. 55–63.
14. Franco M. A. R. Modal analysis of anisotropic diffused-channel waveguide by a scalar finite element method / Franco M. A. R., Passaro A., Neto F. S. // *IEEE Trans. Magn.* – 1998. – Vol. 34, No 5. – P. 2783–2786.
15. Franco M. A. R. Coupling efficiency between optical fiber and Ti:LiNbO₃ channel waveguide / Franco M. A. R., Vasconcellos L. C., Machado J. M. // *Revista Científica Periódica – Telecomunicações*. – 2004. – Vol. 7, No 1. – P. 54–59.
16. Оптика и связь / Козанне А., Флере Ж., Мэтр Г., Руссо М.; пер. с франц. Кочеткова А. Г. и Соколовой Н. Г. под ред. Соколова В. К. – М. : Мир, 1984. – 502 с.
17. Хансперджер Р. Интегральная оптика. Теория и технология / Хансперджер Р.; пер. с англ. под ред. Сыгучева В. А. – М. : Мир, 1985. – 384 с.
18. Фотоника / под ред. Балкански М. и Лалемана П.; пер. с англ. и франц. под ред. Елинсона М. И. – М. : Мир, 1978. – 416 с.
19. Пат. 2244952 РФ, МПК G 02 F 1/09, G 02 B 6/12. Магнитооптический переключающий элемент с вращателем плоскости поляризации на эффекте Фарадея / Дидосян Ю. С. – № 2002109588/28, заявл. 03.09.2000; опубл. 20.01.05, Бюл № 2.
20. Hao-Bing Liu. Moving polymer waveguides and latching actuator for 2 × 2 MEMS optical switch / Hao-Bing Liu, F. Chollet // *J. Microelectromech. Syst.* – 2009. – Vol. 18, No 3. – P. 715–724.
21. Sensors, nanoscience, biomedical engineering, and instruments / ed. Dorf R. C. – Boca Raton, London, New York : CRC Press, 2006. – 388 p.
22. Papadimitriou G. I. Optical switching: switch fabrics, techniques, and architectures / Papadimitriou G. I. // *J. Lightwave Technol.* – 2003. – Vol. 21, No 2. – P. 384–405.
23. 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.
24. Magneto-optic-based fiber switch for optical communications / Bahuguna R., Mina M., Tioh J.-W., Weber R. J. // *IEEE Trans. Magn.* – 2006. – Vol. 42, No 10. – P. 3099–3101.

25. Пат. 49667 Україна, МПК G 02 F 1/00. Волоконний магнітооптичний перемикач / Басиладзе Г. Д., Долгов О. І., Бержанський В. Н. – № u200910724; заявл. 23.10.09; опубл. 11.05.10; Бюл. № 9.
26. Пат. 170060 Китай, МПК G 02 F 1/09, G 02 F 1/01. Total fiber-optical magneto-optical shutter / Weng Zihua Huang. – № CN20051074523; заявл. 25.05.05; опубл. 23.11.05.
27. Пат. 53936 Україна, МПК G 02 B 6/26, G 02 B 6/34. Волоконний магнітооптичний перемикач / Басиладзе Г. Д., Долгов О. І., Бержанський В. Н. – № u201004040; заявл. 06.04.10; опубл. 25.10.10; Бюл. № 20.
28. Пат. 49666 Україна, МПК G 02 F 1/01. Волоконний магнітооптичний перемикач / Басиладзе Г. Д., Долгов О. І., Бержанський В. Н. – № u200910711; заявл. 23.10.09; опубл. 11.05.10; Бюл. № 9.
29. Басиладзе Г. Д. Волоконно-оптический модуль переключателя каналов на базе эпитаксиальной пленки феррита граната / Басиладзе Г. Д., Бержанский В. Н., Долгов А. И. // Ученые записки Таврического национального университета имени В.И. Вернадского. Серия «Физико-математические науки». – 2011. – Т. 24 (63), № 2. – С. 104–113.
30. Basiladze G. D. Modulation of light polarization at its extending along a plane of ferrite garnet epitaxial film / Basiladze G. D., Berzhansky V. N., Dolgov A. I. // Intern. Conf. “Functional Materials” (ICFM-2011), Partenit, Ukraine, Oct. 3-8, 2011 : abstracts. – Simferopol : DIP, 2011. – P. 198.
31. Irvine S. E. A miniature broadband bismuth-substituted yttrium iron garnet magneto-optic modulator / Irvine S. E., Elezzabi A. Y. // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2003. – Vol. 36. – P. 2218–2221.
32. Irvine S. E. Wideband magneto-optic modulation in a bismuth-substituted yttrium iron garnet waveguide / Irvine S. E., Elezzabi A. Y. // Opt. Commun. – 2003. – Vol. 220, No 4-6. – P. 325–329.
33. Колотов О. С. Влияние анизотропии типа «легкая плоскость» на длительность переходных процессов в магнитных пленках и пластинах / Колотов О. С., Матюнин А. В., Поляков П. А. // ЖТФ. – 2011. – Т. 81, вып.1. – С. 82–86.
34. Polarization beam combiner / Splitter [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.optolinkcorp.com/pdf/CS/COM_2x2.pdf, свободный.
35. 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.
36. Simple micro-lens with polymer-filled trench in slab waveguide / Tsukamoto K., Sugama A., Wakino Y. et al. // Fujitsu Sci. Tech. J. – 2002. – Vol. 38, No 1. – P. 54–63.
37. Two-dimensional microlens arrays in silica-onsilicon planar lightwave circuit technology / Glebov A. L., Huang L., Aoki S. et al. // J. Microlith. Microfab. Microsyst. – 2003. – Vol. 2. – P. 309–318.
38. Введение в интегральную оптику / под ред Барноски М.; пер. с англ. под ред. Шманова Т. А. – М. Мир, 1977. – 267 с.
39. Faraday rotation spectra analysis of Bi - substituted mixed rare-earth iron garnet crystals in optical communication band / Xu Z. C., Yan M., Miao Li et al. // J. Appl. Phys. – 2007. – Vol. 101, No 5. – 053910.
40. Пат. 70833 Україна, МПК G 02 F 1/09. Магнітооптичний обертач площини поляризації світла / Басиладзе Г. Д., Долгов О. І., Бержанський В. Н. – № u201114805; заявл. 13.12.2011; опубл. 25.06.2012, Бюл. № 12.
41. Physical properties and behaviour of highly bi-substituted magneto-optic garnets for applications in integrated optics and photonics / Nur-E-Alam M., Vasiliev M., Alameh K., Kotov V. // Adv. Opt. Technol. – 2011. – article number 971267, 7 p.
42. Chen R. T. A high-speed low-voltage stress-induced micromachined 2x2 optical switch / Chen R. T., Wu M. C. // IEEE Photon. Technol. Lett. – 1999. – Vol. 11, No 11. – P. 1396–1398.
44. Magnetic photonic crystals: 1-D optimization and applications for the integrated optics devices / Vasiliev M., Alameh K. E., Belotelov V. I. et al. // J. Lightwave Technol. – 2006. – Vol. 24, No 5. – P. 2156–2162.
45. MTP corporation. A superstore for material researches of engineers [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.mtixtl.com/index.aspx, свободный.
43. Wavelength-insensitive optical switch based on twist nematic liquid crystal (TNLC) /Kun-Yi Lee, Wei-Yu Lee, Yen Chang Tzeng. // Proc. SPIE. – 1996. – Vol. 2893. – P. 243–248.

Басиладзе Г. Д. Электро- і магнітооптичні перемикачі для волоконно-оптичних мереж зв'язку / **Басиладзе Г. Д., Бержанський В. Н., Долгов О. І.** // Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Фізико-математичні науки. – 2012. – Т. 25(64), № 1. – С. 140-159.

На основі літературних даних проаналізований сучасний стан розробок в області волоконно-оптичних перемикачів, що базуються на необ'ємних магнітооптичних елементах. Проведено їхнє порівняння з аналогічними пристроями на основі ніобата літію по показниках, що характеризують роботу перемикачів. Акцентується увага на тім, що властиві магнітооптичним матеріалам відмінні риси створюють передумови для розробки пристроїв, конкурентоспроможних на ринку волоконно-оптичних модуляторів і перемикачів.

Ключові слова: волоконно-оптичний перемикач, магнітооптична плівка, активний елемент перемикача.

Basiladze G. D. Electro- and magneto-optical switches for fiber-optical telecommunication networks / **Basiladze G. D., Berzhansky V. N., Dolgov A. I.** // Scientific Notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. – Series: Physics and Mathematics Sciences. – 2012. – Vol. 25(64), No 1. – P. 140-159.

On the bases of literary data we analyzed the current state of developments in the field of fiber-optic switch, which are not based on magneto-optical elements of great volume. We compared them with similar devices bases on lithium niobate according to the indicators characterizing the operation of switches. Attention is paid to the fact the typical magneto-optical materials distinctions create preconditions for the development of devices competitive on the market of fiber-optics modulators and switches.

Keywords: fiber-optic switch, magneto-optical film, the active element of the switch.

Поступила в редакцію 22.04.2012 г.