УДК 537.632.3

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФЕРРИТОВ В УПРАВЛЕНИИ ДЕМУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕМ

Глущенко А.Г., Глущенко Е.П., Иванников А.П.

ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики», Самара, e-mail: gag646@yandex ru

Рассматриваются вопросы построения устройств управления параметрами оптических телекоммуникационных систем. Ограниченная скорость работы электронных устройств определила необходимость использования оптических систем, в которых необходимым элементом являются системы спектрального уплотнения. Известные системы мультиплексирования и демультиплексирования построены на основе оптических призм, дифракционных решеток оптического диапазона длин волны высокоскоростных систем телекоммуникации, брегговских решеток и обладают существенными недостатками. Это отсутствие возможности перестройки, сложность настройки из-за необходимости юстировки, механическая хрупкость. Использование дисперсионных свойств ферритов и возможность их управлением внешними полями позволяет с помощью внешней системы подмагничивания реализовать возможность управления параметрами демультиплексора с высокой скоростью, определяемой только параметрами системы подмагничивания. Эта возможность возникла в последнее время, благодаря улучшению параметров ферритов, уровень потерь энергии в которых достиг приемлемого для устройств оптики уровня. Рассматриваются демультиплексоры на основе прозрачных для электромагнитных волн ферритовых пленок, малая толщина которых позволяет обеспечить малый уровень потерь энергии сигналов. Демультиплексоры на ферритовых пленках высокотехнологичны в изготовлении, позволяя провести автоматизацию процесса производства, обладают большей теплостойкостью, механической надежностью, не требуют сложной юстировки, однако имеют меньший диапазон перестройки.

Ключевые слова: гиротропия, ферриты, демультиплексор, дисперсия, призма, пленка

USING FERRITES IN DEMULTIPLIXING CONTROL

Gluschenko A.G., Gluschenko E.P., Ivannikov A.P.

Volga State University of Telecommunications and Informatics, Samara, e-mail: gag646@yandex.ru

Problems of construction of control devices for parameters of optical telecommunication systems are considered. The limited speed of operation of electronic devices has determined the need to use optical systems, in which wavelength division multiplexing systems are a necessary element. Known multiplexing and demultiplexing systems are based on optical prisms, diffraction gratings in the optical wavelength range of high-speed telecommunication systems, Bragg gratings and have a significant drawback. These are the lack of the possibility of restructuring, the complexity of the adjustment due to the need for adjustment, and mechanical fragility. The use of the dispersion properties of ferrites and the ability to control them by external fields makes it possible, using an external magnetizing system, to realize the possibility of controlling the parameters of the demultiplexer at a high speed, determined only by the parameters of the magnetizing system. This opportunity has arisen recently due to the improvement of the parameters of ferrites, the level of energy losses in which has reached an acceptable level for optical devices. A demultiplexer based on ferrite films transparent to electromagnetic waves is considered, the small thickness of which allows ensuring a low level of signal energy losses. Demultiplexers on ferrite films are high-tech in production, allowing for the automation of the production process, have greater heat resistance, mechanical reliability, do not require complex adjustment, but have a smaller tuning range.

Keywords: gyrotropy, ferrites, demultiplexer, dispersion, prism, film

Быстродействие электронных устройств, определяющих скорость передачи и обработки информации, ограничено скоростями порядка 40 Гбит/с, поэтому дальнейшее увеличение скорости передачи сигналов по одному каналу требует использования оптических методов [1]. При создании магистральных линий связи на большое число каналов используются возможности, открываемые спектральным уплотнением или мультиплексированием по длинам волн (WDM – Wavelength Division Multiplexing) [2, 3]. Принцип работы заключается в том, что в волоконную оптическую линию связи одновременно вводится излучение от нескольких передатчиков, работающих на разных длинах волн, а на приёмном конце с помощью оптических фильтров происходит разделение сигналов. Для объединения и разделения оптических несущих могут использоваться различные типы мультиплексоров, работа которых основана на различных известных явлениях физической оптики: дисперсии, дифракции, интерференции [4, 5]. Применяемые в линиях связи и телекоммуникационных системах мультиплексоры и демультиплексоры должны вносить малые потери, а мультиплексоры, кроме того, обеспечивать высокую степень изоляции между каналами (высокий уровень развязки). В используемых в настоящее время

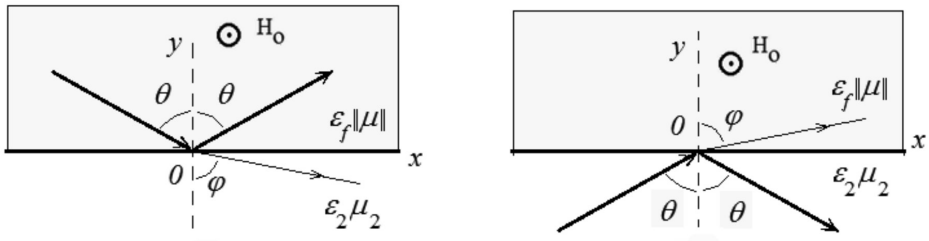
системах мультиплексирования используются высококачественные, но не регулируемые элементы оптики: оптические призмы, дифракционные решетки, брегговские решетки [6]. Необходимость оперативной перестройки структуры мультиплексоров возникает по разным причинам. Некоторые из них: перераспределение потоков данных в сети в связи с вводом в действие новых узлов, исключением старых, адаптация к неисправностям. Отсутствие возможности перестройки, сложность юстировки определяет высокую стоимость устройств и высокую трудоемкость производства. Использование дисперсионных свойств материалов, чистота которых резко повысилась в последнее время, дает возможность создать новые устройства с высокой скоростью управления параметрами. Связь между магнитной и электрической подсистемами в ферритах и ферроиках, проявляющаяся в виде магнитоэлектрических эффектов, дает возможность с помощью магнитных или электрических полей управлять магнитными свойствами материала и параметров устройств на их базе. Анизотропные свойства материалов дают большие возможности для управления волновыми процессами и создания новых приборов [7]. В последнее время, благодаря появлению новых материалов, стали активно исследоваться вопросы магнитооптики, появились новые устройства магнитооптики. Использование гиротропных сред в оптическом диапазоне в настоящее время ограничивается эффектом Фарадея (модуляторы, выключатели, фазовращатели и др.). На основе монокристаллических магнитооптических пленок ферритов-гранатов с повышенным содержанием висмута и разными типами магнитной анизотропии разрабатываются устройства управления световыми потоками в оптических информационных системах (оптические модуляторы и переключатели). Приборы на основе этого эффекта имеют достаточно большие размеры и не могут быть выполнены методами интегральной технологии. В настоящей работе предлагается метод управления мультиплексированием за счет использования эффекта управления параметрами отражения и прохождения сигнала через границу раздела диэлектрик – подмагниченный феррит. Это позволяет создать новые устройства управления, в том числе в интегральном исполнении. Использование гиротропных материалов в виде тонких пленок ферритов позволяет достаточно просто реализовать управляемое внешним магнитным полем демультиплексирование в интегральных оптических схемах.

Моделирование и основные соотношения

Рассмотрим для примера падение волны поляризации H (H_x, H_y, E_z) в плоскости x0y на границу раздела феррит – диэлектрик в прямом и в обратном направлениях. При подмагничивании вдоль координатной оси 0z, перпендикулярной плоскости падения, не происходит преобразование поляризации волн и может быть получено аналитическое решение. Параметры феррита характеризуются диэлектрической проницаемостью ε_f (изотропной) и тензором магнитной проницаемости $\|\mu\|$ [7–8]:

$$\|\mu\| = \begin{bmatrix} \mu & -i\mu_a & 0 \\ i\mu_a & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu_z \end{bmatrix},$$

с компонентами тензора: $\mu = 1 - \dfrac{\omega_H \omega_M}{\omega^2 - \omega_H^2}$, $\mu_a = \dfrac{\omega\omega_M}{\omega^2 - \omega_H^2}$, $\mu_z = 1$, $\omega_M = \gamma M_s$, M_s – величина намагниченности насыщения, $\omega_H = \gamma H_0 = \dfrac{ge}{2mc} H_0$ – частота резонанса, H_0 – величина поля подмагничивания, $g \approx 2$ – фактор спектроскопического расщепления. Изотропный диэлектрик имеет параметры диэлектрической проницаемости ε_2 и магнитной проницаемости $\mu_2 = 1$.



а) *б)*

Рис. 1. Прохождение луча через границу феррит – диэлектрик

Из уравнений Максвелла следует, что волновые уравнения для H (H_x, H_y, E_z) волн в подмагниченном вдоль координатной оси 0z феррите и в диэлектрике имеют вид

$$\frac{\partial^2 E_{z1}}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 E_{z1}}{\partial y^2}+k_0^2\varepsilon_f\mu_\perp E_{z1}=0,$$

$$\frac{\partial^2 E_{z2}}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 E_{z2}}{\partial y^2}+k_0^2\varepsilon_2 E_{z2}=0,$$

где $\mu_\perp=\dfrac{\mu^2-\mu_a^2}{\mu}$ – поперечная магнитная проницаемость. С учётом частотной зависимости $\mu_\perp=\dfrac{\omega^2-(\omega_H+\omega_M)^2}{\omega^2-(\omega_H+\omega_M)\omega_H}$.

Основные результаты и обсуждение

Учет граничных условий в плоскости раздела сред $E_{z1}(y=0)=E_{z2}(y=0)$ приводит к обобщенному соотношению Снеллиуса. Оно связывает углы падения θ, преломления φ (рис. 1, *а*, *б*) и параметры граничащих сред, которое для структуры, показанной на рис. 1, *а*, можно представить в виде

$$\frac{\sin\theta}{\sin\phi}=\frac{\sqrt{\varepsilon_2\mu}}{\sqrt{\varepsilon_f\left(\mu^2-\mu_a^2\right)}}.$$

При полном внутреннем отражении (ПВО) угол преломления $\varphi\to\pi/2$. В этом случае угол полного внутреннего отражения для границы феррит – диэлектрик определяется соотношением

$$\theta_{cr\,f\to d}=\arcsin\sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_f}\frac{\omega^2-(\omega_H+\omega_M)\omega_H}{\omega^2-(\omega_H+\omega_M)^2}}$$

и зависит от величины поля подмагничивания и намагниченности феррита [8]. Отсюда следует, что при падении волны из феррита на границу с диэлектриком полное внутреннее отражение наблюдается в области прозрачности феррита, которая наблюдается в диапазонах частот вне области частот ферримагнитного резонанса (ФМР):

$$\omega<\sqrt{\omega_H(\omega_H+\omega_M)},\ \omega>\omega_H+\omega_M\partial.$$

В случае если, наоборот, волна падает из диэлектрика на границу раздела с ферритом, то угол полного внутреннего отражения определяется в виде

$$\theta_{crd\to f}=\arcsin\left(\sqrt{\frac{\varepsilon_1\mu_\perp}{\varepsilon_2}}\right)$$

или

$$\theta_{crd\to f}=\arcsin\sqrt{\frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_2}\frac{\omega^2-(\omega_H+\omega_M)^2}{\omega^2-(\omega_H+\omega_M)\omega_H}}$$

и полное внутреннее отражение наблюдается при условии $\varepsilon_2>\varepsilon_f\mu_\perp$, если $\mu_\perp>0$, т.е. в области частот (или полей подмагничивания). Наблюдается невзаимность структуры по эффекту ПВО. Для прямых и обратных волн эффект ПВО наблюдается в разных диапазонах частот. Отметим, что явление ПВО на границе раздела диэлектрик – феррит существует только в узких диапазонах частот в области ФМР (рис. 2). Также зависит от намагниченности феррита, от величины поля подмагничивания и соотношения диэлектрических проницаемостей сред ($\varepsilon_f/\varepsilon_2$). Наиболее сильная зависимость критического угла эффекта ПВО от величины поля подмагничивания наблюдается в области ФМР.

Явление полного внутреннего отражения на границе раздела диэлектрик – феррит существует только в узких диапазонах частот (для $\varepsilon_f/\varepsilon_2=1{,}5$ область выделена на рисунке серым цветом). В области частот $0.6\le\omega_H/\omega\le0.8$ эффект ПВО не наблюдается в любом случае.

Разложение спектра при отражении и прохождении волны через пленку

Рассмотрим прохождение луча через ферритовую пленку (рис. 3). Угол преломления прошедшего границу раздела сред луча φ и его смещение Δ зависит от толщины пленки d показателей преломления граничащих с пленкой сред и параметров ферритовой пленки. Влияние дисперсии параметров пленки приводит к разделению частотных составляющих спектра сигнала (рис. 4).

Смещение Δ луча, прошедшего через пленку толщиной d при угле падения θ, определяется соотношением ($\varepsilon_2=1$, $\mu_2=1$):

$$\Delta=d\sin\theta\left[1-\frac{\sin\theta\cos\theta}{\sqrt{\varepsilon_f\mu_\perp-\sin^2\theta}}\right]=d\sin\theta\left[1-\frac{\cos\theta}{\sqrt{\varepsilon_f\dfrac{\omega^2-(\omega_H+\omega_M)^2}{\omega^2-\omega_H(\omega_H+\omega_M)_\perp}-\sin^2\theta}}\right].$$

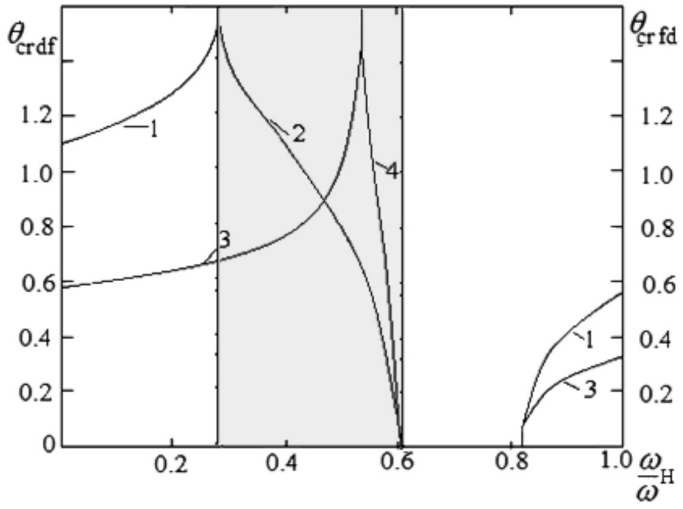


Рис. 2. Зависимость критических углов полного внутреннего отражения при прохождении волны через границу раздела сред феррит – диэлектрик (кривые 1 – $\varepsilon_f/\varepsilon_2$ = 1,5, 3 – $\varepsilon_f/\varepsilon_2$ = 4) и через границу диэлектрик-феррит (кривые 2 – $\varepsilon_f/\varepsilon_2$ = 1,5, 4 – $\varepsilon_f/\varepsilon_2$ = 4) в зависимости от нормированного параметра частоты

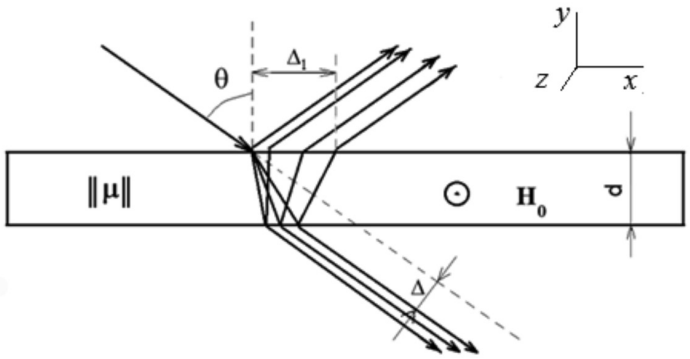


Рис. 3. Разложение спектра при отражении и прохождении волны через пленку

Для отраженного луча его смещение за счет взаимодействия с пленкой определяется соотношением:

$$\Delta_1 = \frac{2d\sin\theta}{\sqrt{\varepsilon_f \dfrac{\omega^2 - (\omega_H + \omega_M)^2}{\omega^2 - \omega_H(\omega_H + \omega_M)} - \sin^2\theta}}.$$

Таким образом, величиной смещения отраженных от пленки и прошедших через пленку лучей можно управлять с большой скоростью меняя угол падения θ и величину поля подмагничивания H_0.

На рис. 4 показано изменение относительной величины смещения луча нормированной на толщину пленки, прошедшего через пленку, от отношения параметра отношения частоты сигнала к резонансной частоте. При фиксированной частоте сигнала этот график позволяет оценить зависимость смещения луча от величины поля подмагничивания ($\omega_H = \gamma H_0$). Относительное смещение луча возрастает с увеличением угла падения θ. Из графиков видно, что наиболее существенно величина магнитного поля влияет на смещение луча в области больших полях подмагничивания при любых углах падения. С ростом угла падения смещение луча уменьшается. Величина смещения имеет порядок толщины пленки и легко обнаруживается экспериментально.

Аналогичная зависимость смещения луча от величины поля подмагничивания наблюдается и в области низких частот $(\omega << \omega_H)$.

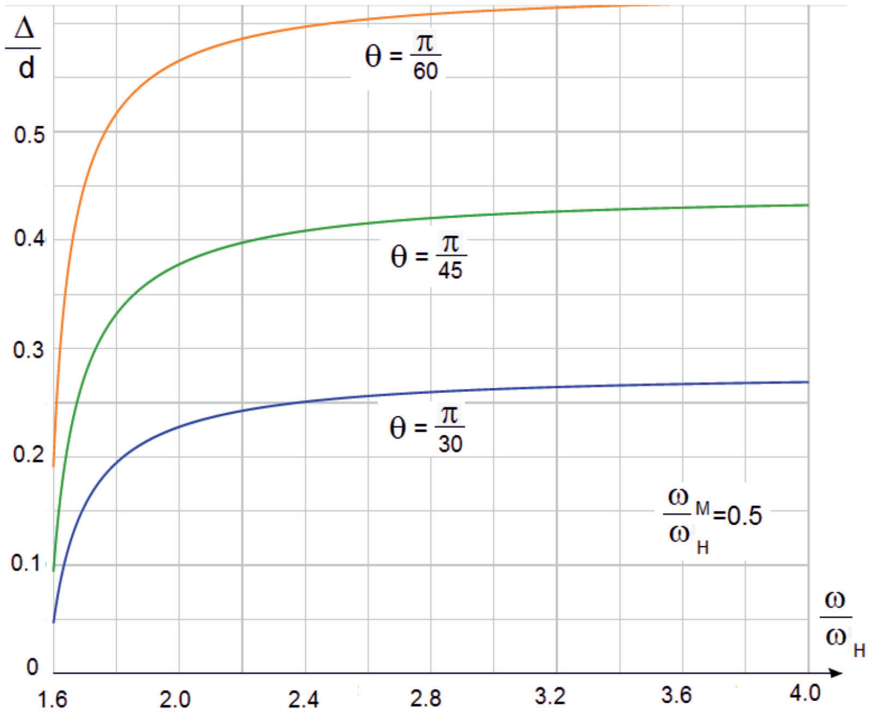


Рис. 4. Нормированное на толщину пленки смещение прошедшего луча в зависимости от нормированной на резонансную частоту поля подмагничивания ($\varepsilon_2 = 1$, $\varepsilon_f = 4$)

Таким образом, тонкие пленки феррита, имея существенные преимущества в технологии изготовления, могут эффективно использоваться в интегральных устройствах мультиплексирования и демультиплексирования. Полученные результаты могут быть обобщены на случай других материальных сред, обладающих гиротропией [9].

Заключение

Создание эффективных элементов управления оптическими элементами является важной задачей оптоэлектроники. Ферриты могут эффективно использоваться для управления параметрами мультиплексоров и демультиплексоров, обеспечивая высокую скорость управления, ограниченную только скоростью перестройки магнитной системы. Получены соотношения с учетом параметров гиротропных сред и показана зависимость угла прохождения границы раздела сред и угла прохождения гиротропной пленки от величины поля подмагничивания. Определены условия полного внутреннего отражения и зависимость угла полного внутреннего отражения от величины поля подмагничивания. Подмагничивание позволяет менять угол полного внутреннего отражения в широких пределах величиной магнитного поля. На границе раздела феррит – диэлектрик эффект полного внутреннего отражения реализуется для прямых и обратных волн в различных диапазонах частот.

Список литературы

1. Shukla P., Kaur K.P. Performance Analysis of EDFA for different Pumping Configurations at High Data Rate. International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT). 2013. V. 2. N 5.

2. Наний О.Е. Основы технологии спектрального мультиплексирования каналов передачи (WDM) // LIGHTWAVE Russian Edition. 2004. № 2. С. 47–52.

3. Kamaldeep Kaur K.S. Bhatia. Optical Time Division Multiplexing Using Terahertz Optical Asymmetric Demultiplexer. Journal of Optical Communications. 2015. V. 36: No. 4. DOI: 10.1515/joc-2014-0087.

4. Ромашова В.Б., Пак К.Дж., Шаймадиева Д.С., Буров Н.В. Широкополосные модовые мультиплексоры. Альтернативное решение для телекоммуникаций и научных исследований // Фотоника. 2018. Т. 12. 8 (76). С. 750–760. DOI: 10.22184/1993-7296.2018.12.8.750.760.

5. Park K.J. et al. All-fiber mode division multiplexer optimized for C-band. Optical Fiber Communication Conference. Optical Society of America.2014: M3K. 2.

6. Верхозин А.Н. Магнитооптика вчера и сегодня // Вестник Псковского государственного университета. Серия: Естественные и физико-математические науки. 2015. С. 114–123.

7. Gluschenko A., Gluschenko E., Zhukov S. Total internal reflection effect on gyrotropic interface. Physics of Plasmas. 2018. V. 25 (2). P. 022118. DOI: 10.1063/1.5000795.

8. Pyatakov A.P., Meshkov G.A., Zvezdin A.K. Electric polarization of magnetic textures: New horizons of micromagnetism. Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2012. V. 324. Iss. 21. P. 3551–3554.

9. Глущенко А.Г., Глущенко Е.П., Жуков С.В., Агаповичева А. Эффект ПВО на границе намагниченной плазмы // Успехи науки и образования. 2016. № 8 (12). С. 114–116.