

УДК 681.7.068 + 537.622

**ВЛИЯНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА  
ФАРАДЕЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ, ПРОШЕДШЕГО  
ПЛАНАРНЫЙ МАГНИТОАКТИВНЫЙ ЭЛЕМЕНТ ВОЛОКОННО-  
ОПТИЧЕСКОГО ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯ**

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

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

Экспериментально исследовано фарадеевское вращение в эпитаксиальной пленке феррит-граната (ЭПФГ) состава  $(\text{Bi}_{1,73}\text{Lu}_{1,24}\text{Ca}_{0,03})(\text{Fe}_{3,82}\text{Ga}_{1,15}\text{V}_{0,03})\text{O}_{12}$  в зависимости от длины волны в рабочем диапазоне 1270 – 1625 нм. Найдена эмпирическая зависимость удельного фарадеевского вращения для этой пленки от длины волны света и приведены примеры расчета на ее основе рабочей длины магнитоактивного элемента волоконнооптического переключателя и его модуляционных характеристик от колебаний длины волны светового пучка на его входе.

**Ключевые слова:** эпитаксиальная пленка феррит-граната, спектральная зависимость удельного фарадеевского вращения.

**ВВЕДЕНИЕ**

Одной из основных характеристик магнитооптических (МО) пленочных материалов, определяющих конструктивные параметры создаваемых на их основе устройств, является удельное фарадеевское вращение (ФВ) в рабочем диапазоне оптических длин волн. Зависимость ФВ пленок от длины волны исследована преимущественно в видимом спектральном диапазоне. Имеется достаточно данных о ФВ для пленок с различным химическим составом, структурой, толщиной магнитоактивного слоя, типом магнитооптической анизотропии, которые позволяют сориентироваться при выборе материала с подходящими МО свойствами для работы в этом диапазоне длин волн [1-4]. Однако для телекоммуникационного диапазона длин волн (1270–1625 нм) такая возможность весьма ограничена. В литературе можно найти данные лишь для нескольких образцов материалов, имеющих разный химический состав [7-9]. В настоящей работе приводятся результаты экспериментального исследования ФВ в МО пленке состава  $(\text{Bi}_{1,73}\text{Lu}_{1,24}\text{Ca}_{0,03})(\text{Fe}_{3,82}\text{Ga}_{1,15}\text{V}_{0,03})\text{O}_{12}$ , которые использованы для расчета длины  $L$  магнитоактивного элемента волоконно-оптического переключателя в направлении распространения света и оценки изменений характеристик излучения на его выходе в зависимости от длины волны света телекоммуникационного диапазона.

**1. ЭКСПЕРИМЕНТ**

Пленка была выращена методом жидкофазной эпитаксии на подложке из галлий-гадолиниевого граната (ГГГ) толщиной  $\approx 500$  мкм, имеющей ориентацию (111). Она

обладала плоскостной магнитной анизотропией с полем в направлении осей легкого и трудного намагничивания, соответственно,  $H_L \approx 1$  Э и  $H_T \approx 30$  Э. Пленка имела толщину  $h \approx 12$  мкм. Торцы пленки были плоскопараллельными и оптически отполированными для просвечивания в плоскости пленки так, чтобы свет распространялся вдоль оси ее легкого намагничивания (см. Рис. 1). Длина оптического пути, равная расстоянию между полированными торцами, составляла  $L = 3,88$  мм.

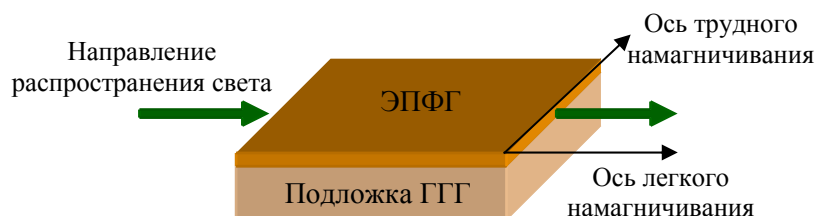


Рис. 1. Схема прохождения света через пленку.

Исследования проводились на пяти оптических длинах волн 1270, 1310, 1490, 1550 и 1625 нм. В качестве источников света применялись полупроводниковые лазерные модули типа ПОМ-14 с волоконными выводами, оконцованными оптическими наконечниками типа FC. На Рис. 2 приведена схема экспериментальной установки для исследования ФВ в пленке. Излучение лазера вводится в пленку через одномодовое оптическое волокно типа SMF-28e, жестко соединенное с ее входным торцом [5]. В свою очередь в волокно свет вводился через волоконный регулятор плоскости поляризации, с помощью которого плоскость поляризации света ориентировали параллельно плоскости пленки. Такая ориентация считалась достигнутой, когда плоскость поляризации света на выходе пленки в отсутствие магнитного поля совпадала с осью максимального пропускания анализатора поляризации при условии совпадения этой оси с плоскостью пленки. Анализатор поляризации был снабжен лимбом, с помощью которого можно было отсчитывать поворот плоскости поляризации света с точностью  $0,5^\circ$ . Сигнал с анализатора поляризации попадал на германиевый фотоприемник, подключенный к усилителю фототока. Усиленный электрический сигнал, пропорциональный интенсивности света на входе фотоприемника, поступал на вход канала вертикальной развертки самописца. Внешнее магнитное поле создавалось катушками Гельмгольца, между витками которой располагали пленку, ориентированную осью легкого намагничивания вдоль оси катушек. Напряженность магнитного поля можно было плавно изменять от  $-50$  Э до  $+50$  Э пропорционально изменению напряжения, подаваемого на катушки, от  $-5$  до  $+5$  В. Это же напряжение, параллельно подавалось на вход горизонтальной развертки самописца.

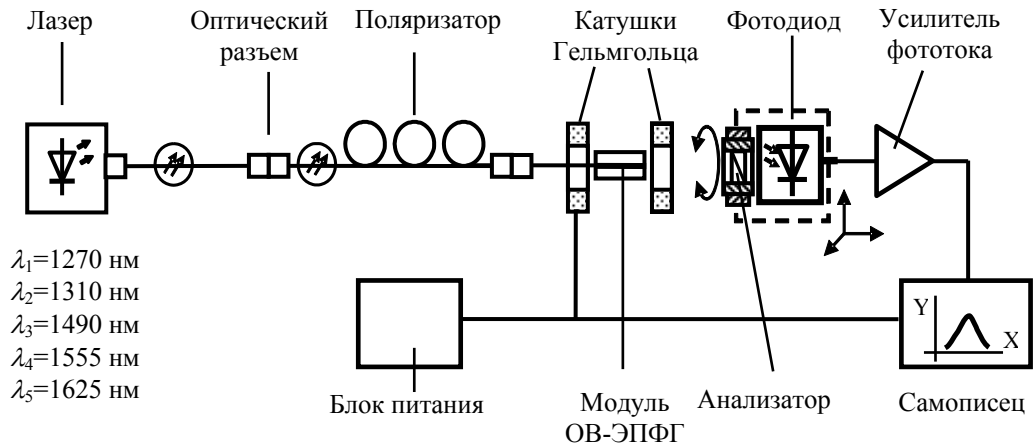


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для исследования ФВ в ЭПФГ.

На Рис. 3 а, б, в, г, д приведены кривые изменения интенсивности света при пропускании через пленку излучения источников с длинами волн, соответственно, 1270, 1310, 1490, 1555 и 1620 нм, которые были получены при следующих условиях. При значении магнитного поля  $-50$  Э, анализатор устанавливался в положение соответствующее максимуму интенсивности света. При изменении напряженности магнитного поля происходило изменение интенсивности света на выходе анализатора. Количество минимумов и максимумов интенсивности  $N$  (без учета первоначального максимума) соответствует кратности поворотов на  $90^\circ$  плоскости поляризации света при изменении напряженности магнитного поля от  $-50$  до  $+50$  Э. При значении магнитного поля  $+50$  Э, путем поворота анализатора в сторону ближайшего экстремума интенсивности света, измерялся дополнительный угол поворота плоскости поляризации  $\varphi$ . Таким образом, полный угол поворота плоскости поляризации света в ЭПФГ составлял

$$\theta = N \cdot 90 + \varphi \quad (1)$$

Удельное фарадеевское вращение  $\theta_F$  вычислялось по формуле:

$$\theta_F = \theta / 2L, \quad (2)$$

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В Таблице 1, приведены вычисленные по формуле (2) экспериментальные значения удельного ФВ исследованной ЭПФГ для длин волн 1270, 1310, 1490, 1550 и 1625 нм.

На Рис. 4 приведена зависимость удельного ФВ от длины волны в исследованном спектральном диапазоне. Экспериментальные результаты могут быть аппроксимированы следующей эмпирической зависимостью:

$$\theta_F(\lambda) = 38,30 + \frac{28,19}{1 + \left(\frac{\lambda}{247,80}\right)^{5,12}} 10^4, \quad \text{°/см}. \quad (3)$$

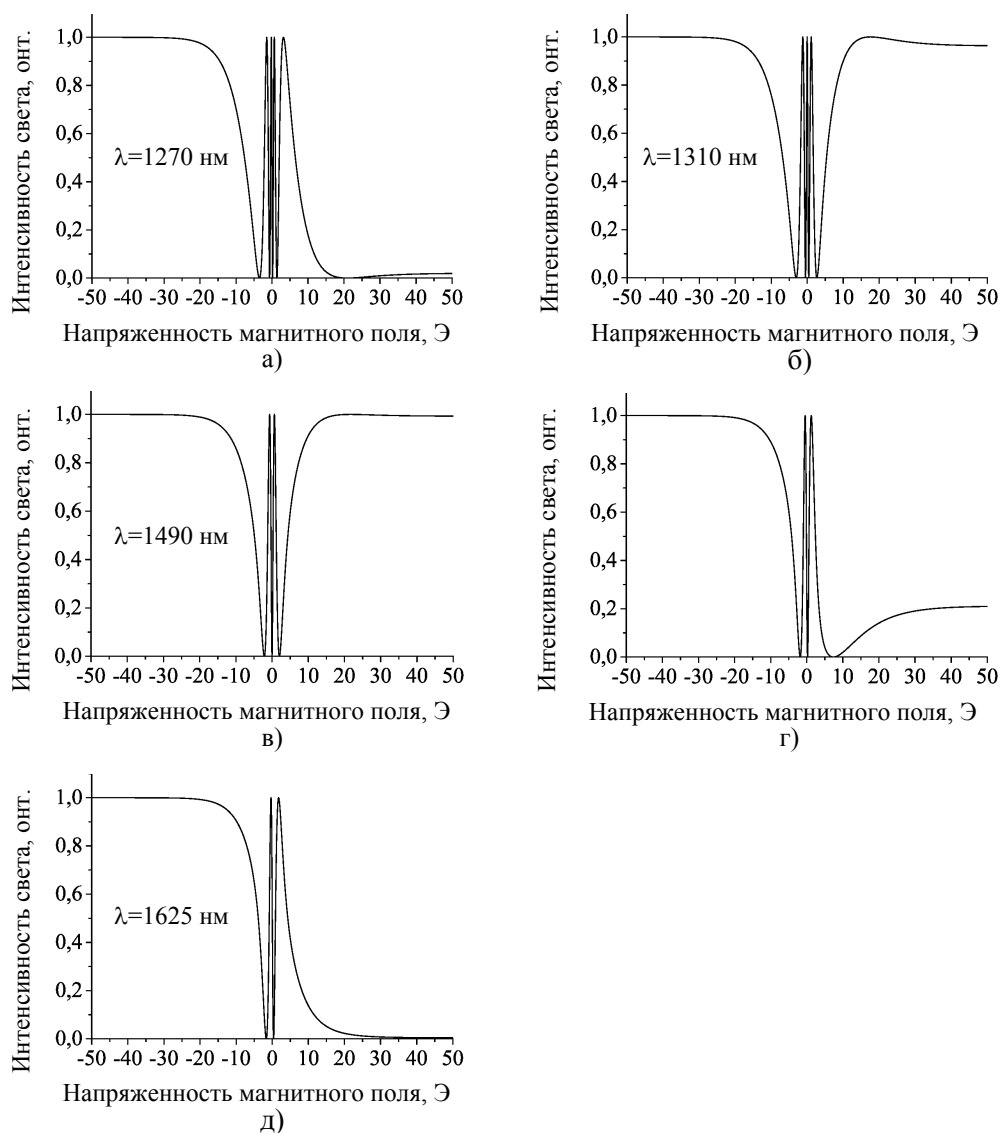


Рис. 3. Кривые изменения интенсивности света при пропускании через ЭПФГ излучения с длинами волн 1270, 1310, 1490, 1555 и 1625 нм.

Таблица 1

Удельное ФВ ЭПФГ состава  $(\text{Bi}_{1,73}\text{Lu}_{1,24}\text{Ca}_{0,03})(\text{Fe}_{3,82}\text{Ga}_{1,15}\text{V}_{0,03})\text{O}_{12}$

Длина волны света $\lambda$ , нм	Удельное фарадеевское вращение $\theta_F$ , °/см
1270	104,4
1310	93,4
1490	68,4
1555	60,9
1625	56,8

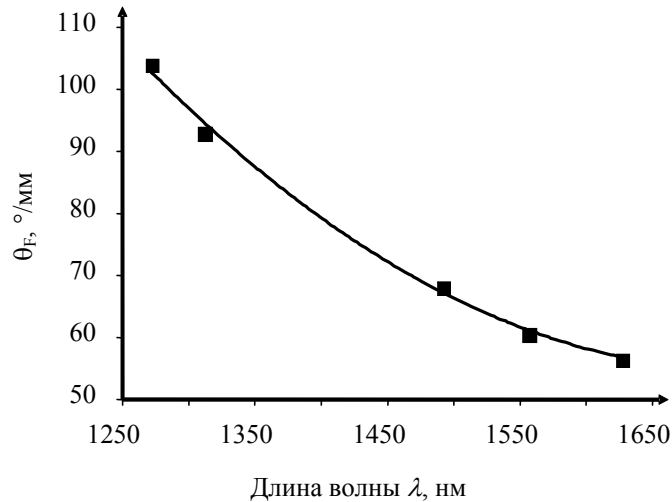


Рис. 4. Зависимость удельного фарадеевского вращения исследуемой пленки от длины волны.

С помощью формулы (3) можно рассчитать оптическую длину пути света для любой из заданных длин волн в этом диапазоне в пленке  $L(\lambda)$ , которая обеспечит необходимый для работы устройства угол поворота плоскости поляризации  $\psi$  при намагничивании полем насыщения. Выражение для этого запишется в виде

$$L(\lambda) = \frac{\psi(\lambda)}{\theta_F(\lambda)}, \text{ см.} \quad (4)$$

В качестве примера в Таблице 2 для каждой из использованных длин волн приведены рассчитанные по формуле (4) длины магнитоактивных элементов, для случая применения в устройствах, где требуется осуществлять модуляцию плоскости поляризации на угол  $\psi = \pm 45^\circ$ .

Таблица 2

Расчетные значения длин магнитоактивных элементов для работы в составе магнитооптических устройств на соответствующих длинах волн

Длина волны света $\lambda$ , нм	Длина магнитооптического элемента, обеспечивающая поворот плоскости поляризации света на угол $\psi = \pm 45^\circ$
	$L(\lambda)$ , мм
1270	0,43
1310	0,48
1490	0,66
1555	0,74
1625	0,79

Такая модуляция, производимая путем перемагничивания пленки импульсами магнитного поля противоположной полярности, т.е. вдоль и против направления распространения света, продемонстрирована, например, в работе [6].

При практическом использовании МО пленки в качестве МО вращателя в модуляторе амплитуды оптического сигнала или переключателе, возможны отклонения плоскости поляризации модулируемого сигнала от заданной величины  $\psi$  на угол  $\pm\Delta\psi$ , вызванные либо неточностями в подборе длины пленки либо, например, колебаниями  $\lambda$  в оптической сети. Эти отклонения приведут к уменьшению значения коэффициента амплитудной модуляции сигнала  $K_{AM}(\lambda)$  для модулятора или переходного затухания для переключателя.

Используя полученное выражение (3), рассчитаем диапазон возможных изменений характеристик устройства в зависимости от колебаний длины волны в интервале  $\pm\Delta\lambda$ .

Дифференцируя (3) по  $d\lambda$  после преобразований получим

$$\frac{d\theta_F(\lambda)}{d\lambda} = -2,61 \cdot 10^{18} \cdot \lambda^{-6} \quad (5)$$

При  $\Delta\lambda \ll \lambda$  изменение удельного фарадеевского вращения при изменении длины волны на  $\Delta\lambda$  с учетом (5) можно выразить как

$$\Delta\theta_F(\lambda) = -2,61 \cdot 10^{18} \cdot \lambda^{-6} \cdot \Delta\lambda, \text{ } ^\circ/\text{см}. \quad (6)$$

Соответственно, с учетом (4)

$$\Delta\psi(\lambda) = \Delta\theta_F(\lambda) \cdot L(\lambda) = -2,61 \cdot 10^{18} \cdot \lambda^{-6} \cdot \Delta\lambda \cdot L(\lambda), \text{ град}. \quad (7)$$

Для определения зависимости коэффициента амплитудной модуляции  $K_{AM}$  МО модулятора от колебаний длины волны применим хорошо известную формулу

$$K_{AM} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (8)$$

где  $I_{\max}$  – максимальная интенсивность света на выходе анализатора, которая обеспечивается при угле  $0^\circ$  между плоскостями поляризации падающего света и анализатора,  $I_{\min}$  – минимальная интенсивность света на выходе анализатора, которая обеспечивается при угле  $90^\circ$  между плоскостями поляризации падающего света и анализатора.

При изменениях угла плоскости поляризации падающего на анализатор света на величину  $\pm\Delta\psi$  интенсивность света  $I_{\max}$  будет уменьшаться, а  $I_{\min}$  – увеличиваться, что приведет к уменьшению  $K_{AM}(\lambda)$ .

Изменение интенсивности света, проходящего через анализатор, от угла между плоскостями поляризации падающего света и анализатора определим, используя закон Малюса

$$I = k \cdot I_0 \cdot \cos^2 \beta, \quad (9)$$

где  $I_0$  – интенсивность света на входе анализатора,  $I$  – интенсивность света на выходе анализатора,  $\beta$  – угол между плоскостями поляризации падающего света и анализатора,  $k$  – коэффициент поглощения анализатора.

Максимальную и минимальную интенсивности света на выходе анализатора с учетом (9) можно выразить как

$$I(\lambda)_{\max} = k \cdot I_0 \cdot \cos^2 \Delta\psi(\lambda), \quad (10)$$

$$I(\lambda)_{\min} = k \cdot I_0 \cdot \cos^2(90 - \Delta\psi(\lambda)) = k \cdot I_0 \cdot \sin^2(\Delta\psi(\lambda)). \quad (11)$$

Подставив (10) и (11) в (9), после преобразований получим

$$K_{AM}(\lambda) = \cos^2(2 \cdot \Delta\psi(\lambda)) = \cos^2(2 \cdot \Delta\theta_F(\lambda) \cdot L(\lambda)), \quad (12)$$

или с учетом (6)

$$K_{AM}(\lambda) = \cos^2(-5,21 \cdot 10^{18} \cdot \lambda^{-6,12} \cdot L(\lambda) \cdot \Delta\lambda) \quad (13)$$

На Рис. 5 в качестве примера представлена расчетная зависимость  $K_{AM}(\lambda)$  МО модулятора для рабочих длин волн 1310 и 1550 нм от колебаний длины волны на входе в пределах полосы  $\Delta\lambda = \pm 40$  нм.

Как видно из Рис. 5 при отклонениях на величину  $\Delta\lambda = \pm 40$  нм от рабочих длин волн 1310 и 1550 нм ухудшение значения  $K_{AM}(\lambda)$  составит не более чем на 1,1 % и на 0,3 %, соответственно.

Используя выражение (7), в качестве примера рассчитаем переходное затухание для переключателя, работающего в режиме “ON/OFF”. Угол между плоскостями поляризации излучения на выходе МО элемента переключателя и анализатора должен быть точно равен  $0^\circ$  или  $90^\circ$ . Тогда будет обеспечиваться, соответственно, либо максимальное пропускание света, либо максимальное его гашение.

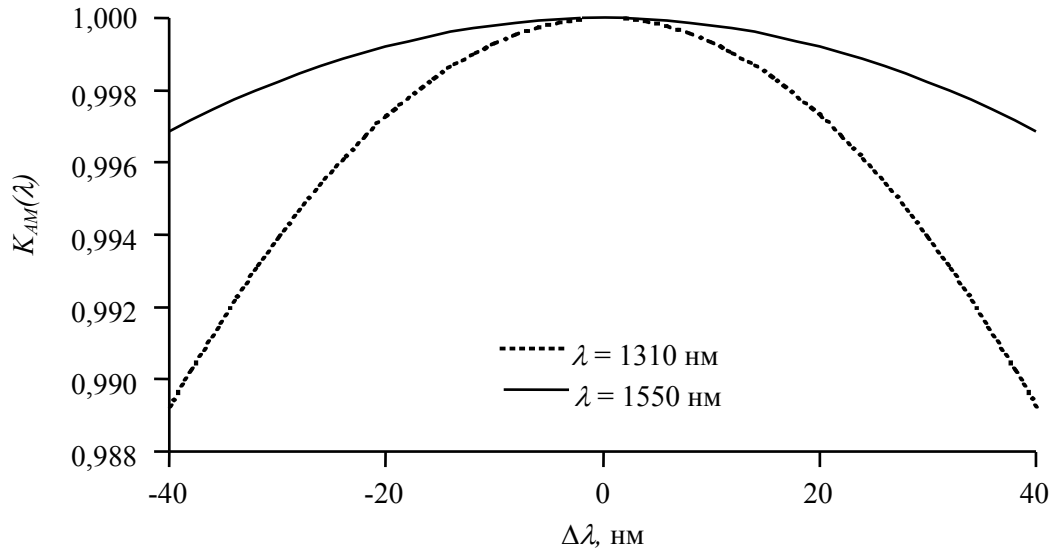


Рис. 5. Зависимость изменения коэффициента амплитудной модуляции модулятора  $K_{AM}(\lambda)$  для длин волн 1310 и 1550 нм от изменения длины волны на входе в пределах полосы  $\Delta\lambda = \pm 40$  нм.

С учетом (7) и (9) дополнительные оптические потери переключателя с МО элементом длиной  $L(\lambda)$ , обеспечивающей выполнение условия  $-45^\circ \leq \psi \leq 45^\circ$ , без учета затухания света в анализаторе, для состояния “ON” составят

$$\alpha(\lambda)_{\text{ON}} = 10 \cdot \lg(\cos^2(-2,61 \cdot 10^{18} \cdot \lambda^6 \cdot \Delta\lambda \cdot L(\lambda))), \text{ дБ} \quad (14)$$

а переходное затухание без учета затухания света в анализаторе, для состояния “OFF” составит

$$\alpha(\lambda)_{\text{OFF}} = 10 \cdot \lg(\sin^2(-2,61 \cdot 10^{18} \cdot \lambda^6 \cdot \Delta\lambda \cdot L(\lambda))), \text{ дБ} \quad (15)$$

На Рис. 6 представлена зависимость дополнительных оптических потерь МО переключателя в состоянии “ON” для длин волн 1310 и 1550 нм, обусловленных колебанием длины волны в оптической сети в спектральной полосе  $\Delta\lambda = \pm 40$  нм.

Как видно из Рис. 6, при отклонениях на величину  $\Delta\lambda = \pm 40$  нм от рабочих длин волн 1310 и 1550 нм, увеличение дополнительных оптических потерь МО переключателя составит не более чем на 0,023 дБ и на 0,007 дБ, соответственно.

На Рис. 7 представлена зависимость переходного затухания МО переключателя в состоянии “OFF” для длин волн 1310 и 1550 нм обусловленного колебанием длины волны в оптической сети в спектральной полосе  $\Delta\lambda = \pm 40$  нм.

Как видно из Рис. 7, при отклонениях на величину  $\Delta\lambda = \pm 40$  нм от рабочих длин волн 1310 и 1550 нм, коэффициент переходного затухания МО переключателя не хуже чем 22,5 и 27 дБ, соответственно. Отметим, что коэффициент переходного затухания МО переключателя наиболее чувствителен к колебаниям длины волны света в оптической сети.

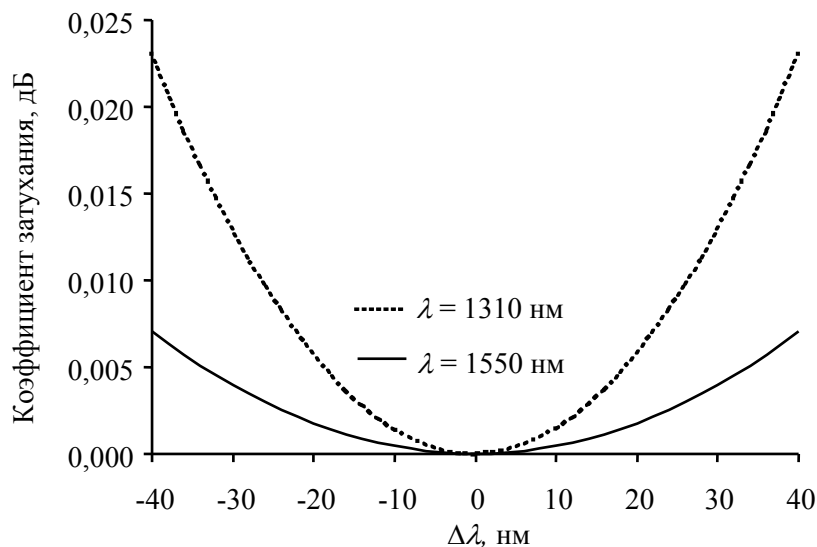


Рис. 6. Зависимость дополнительных оптических потерь МО переключателя в состоянии “ON” для длин волн 1310 и 1550 нм, обусловленных колебанием длины волны в оптической сети.



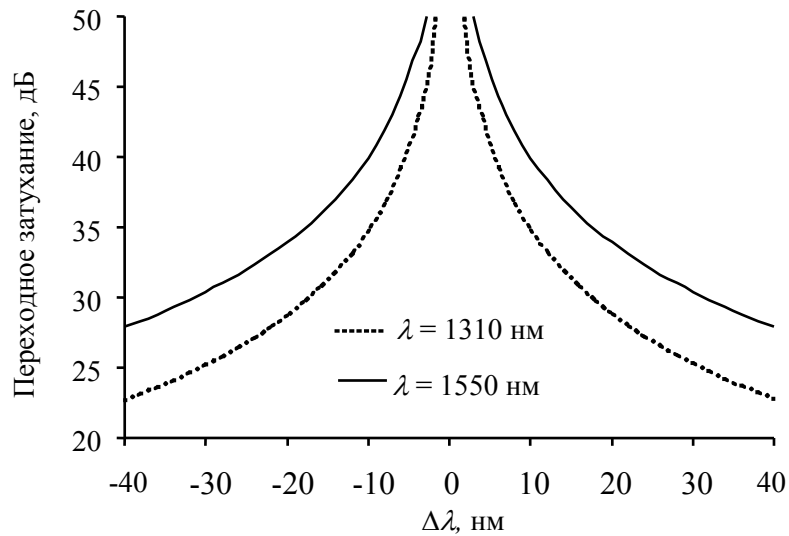


Рис. 7. Зависимость переходного затухания МО переключателя в состоянии “OFF” для длин волн 1310 и 1550 нм, обусловленного колебанием длины волны в оптической сети.

Следует отметить, что полученная кривая зависимости удельного ФВ от длины волны света имеет определенное сходство с приведенными ранее в работах [7, 8] кривыми зависимостей удельного ФВ для объемных МО кристаллов с химическими составами  $(\text{YbBi})_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  [8],  $(\text{YbBi})_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  и  $(\text{HoBi})_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  [7]. При внешнем сходстве наклон кривых для кристаллов разного химического состава разный. Это говорит о возможности уменьшения спектральной зависимости ФВ путем подбора химического состава МО кристалла и концентраций составляющих его элементов, что важно для уменьшения спектральной чувствительности устройств на его основе. Такая возможность экспериментально подтверждена в работе [9], где путем подбора концентраций элементов получен МО кристалл состава  $(\text{Tb}_{0,91}\text{Yb}_{1,38}\text{Bi}_{0,71})\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ , который обладает низким коэффициентом длинноволновой зависимости ФВ ( $-0,009$ ) в диапазоне 1,5 - 1,62 мкм при удельном ФВ  $\theta_F = 1617$  %/см на  $\lambda = 1,55$  мкм. Приведенные характеристики исследованы при падении света по нормали к плоскости кристалла. Показатели светопропускания не приводятся.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально определены коэффициенты фарадеевского вращения для ЭПФГ с химическим составом  $(\text{Bi}_{1,73}\text{Lu}_{1,24}\text{Ca}_{0,03})(\text{Fe}_{3,82}\text{Ga}_{1,15}\text{V}_{0,03})\text{O}_{12}$  на длинах волн 1270, 1310, 1490, 1555 и 1625 нм при введении в пленку света через торец с помощью оптического волокна. Построенная по этим данным спектральная зависимость удельного фарадеевского вращения дает возможность рассчитать необходимую длину магнитоактивного элемента для работы на заданной длине волны света телекоммуникационного диапазона (1270 - 1625 нм). Получены расчетные формулы, позволяющие оценить возможные отклонения параметров волоконно-оптических МО переключателей и модуляторов в зависимости от отклонений длины волны света от заданного номинального значения.

Анализ зависимости этих характеристик от колебаний длины волны света на входе магнитоактивного элемента показывает, что эти колебания в первую очередь влияют на величину переходного затухания оптического переключателя.

#### Список литературы

1. 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. – Vol. 2011, Article ID 971267, 7 p.
2. Faraday rotation spectra of bismuth-substituted ferrite garnet films with in-plane magnetization / Helseth L. E., Hansen R. W., P'yashenko E. I. et al. // *Phys. Rev. B.* – 2001. – Vol. 64, No 17\_174406.
3. Kahl S. Bismuth iron garnet films for magneto-optical photonic crystals : doct. diss. / Kahl S. – Stockholm, 2004. – 133 p.
4. Shaoying Kang. Advanced magneto-optical materials and devices: thesis (Ph. D.) / Shaoying Kang. – Cambridge, Mass., 2007. – 145 p.
5. 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.
6. 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.
7. Faraday rotation spectra of bismuth- substituted rare-earth iron garnet crystals in optical communication band / Guang-Yu Zhang, Xue-Wu Xu, Tow-Chong Chong // *J. Appl. Phys.* – 2004. – Vol. 95, No 10, – P. 5267–5270.
8. Zhao W. Magneto-optic properties and sensing performance of garnet YbBi:YIG / Zhao W. // *Sensors and Actuators A: Physical.* – 2001. – Vol. 89, No 3. – P. 250–254.
9. Faraday rotation spectra analysis of Bi- substituted mixed rare-earth iron garnet crystals in optical communication band / Xu Z. C., Yan M., Li Miao et al. // *J. Appl. Phys.* – 2007. – Vol. 101, No 5\_053910.

**Басиладзе Г. Д. Вплив спектральної залежності коефіцієнта Фарадея на характеристики випромінювання, що пройшло планарний магнітоактивний елемент волоконно-оптичного перемикача / 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. 160-169.**

Експериментально досліджене фарадеевське обертання в епітаксіальній плівці ферит-граната (ЕПФГ) складу  $(\text{Bi}_{1,73}\text{Lu}_{1,24}\text{Ca}_{0,03})(\text{Fe}_{3,82}\text{Ga}_{1,15}\text{V}_{0,03})\text{O}_{12}$  залежно від довжини хвилі в робочому діапазоні 1270 – 1625 нм. Знайдена емпірична залежність питомого фарадеевського обертання для цієї плівки від довжини хвилі світла і наведені приклади розрахунку на її основі робочої довжини магнітоактивного елемента волоконно-оптичного перемикача і його модуляційних характеристик від коливань довжини хвилі світлового пучка на його вході.

**Ключові слова:** епітаксіальна плівка ферит-граната, спектральна залежність питомого фарадеевського обертання.

**Basiladze G. D. Influence of spectroscopic dependence of Faraday coefficient on characteristics of radiation transmitted the planar magnetoactive element of the fiber-optic switch / 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. 160-169.**

Was experimentally investigated the Faraday rotation in epitaxial film ferrite-garnet  $(\text{Bi}_{1,73}\text{Lu}_{1,24}\text{Ca}_{0,03})(\text{Fe}_{3,82}\text{Ga}_{1,15}\text{V}_{0,03})\text{O}_{12}$  depending on the wavelength of the operating range 1270 – 1625 nm. We found the empirical dependence of the specific Faraday rotation for this film on the wavelength of light and were given examples of calculation on the bases of its working length of fiber optic switch magnetoactive element and its modulation characteristic from the oscillations wavelength of light beam at its input.

**Keywords:** epitaxial film of the ferrite-garnet, spectral dependence specific Faraday rotation.

*Поступила в редакцію 22.04.2012 г.*