

DOI 10.30898/1684-1719.2020.1.5

УДК 537.6, 537.311.33

## ЧАСТОТНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ МАГНИТООПТИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАНОСТРУКТУРАХ

М. Р. Жумаев<sup>1</sup>, М. З. Шарипов<sup>1</sup>, В. В. Коледов<sup>2</sup>, В. Г. Шавров<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Бухарский инженерно-технологический институт,  
200100, Узбекистан, г. Бухара, ул. К. Муртазаева, д.15

<sup>2</sup> Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,  
125009, г. Москва, ул. Моховая 11, корп.7

Статья поступила в редакцию 1 января 2020 г.

**Аннотация.** Исследованы теоретически зависимости фарадеевского угла вращения а также дисперсионные свойства магнитного кругового дихроизма в магнитных диэлектрических наноструктурах. Проанализированы спектральные свойства, т.е. частотные зависимости разностей показателей преломления и коэффициентов поглощения диэлектрических кристаллов, которыми определяются характеристики магнитооптических явлений. Определены условия, при которых значения выше указанных величин могут иметь экстремальные значения. Показано, что их максимальные значения обратно пропорциональны частоте затухания электронной волны. Следовательно, при малых поглощениях удаётся существенно увеличить величины исследуемых магнитооптических явлений. Отмечается, что исследованные аномалии могут найти применения в устройствах на основе магнитооптики для телекоммуникаций и фотоники.

**Ключевые слова:** магнитооптические явления, фарадеевский угол вращения, угол эллиптичности.

**Abstract.** The dependences of the Faraday rotation angle and the dispersion properties of magnetic circular dichroism in magnetic dielectric nanostructures are theoretically investigated. The spectral properties are analyzed, i.e. frequency dependences of the differences in refractive indices and absorption coefficients of dielectric crystals, which determine the characteristics of magneto-optical

phenomena. The conditions in which the values of the above values can have extreme values are determined. It is shown that their maximum values are inversely proportional to the attenuation frequency of the electron wave. Therefore, at low absorption, it is possible to significantly increase the magnitude of the studied magneto-optical phenomena. It is noted that the studied anomalies can find applications in devices based on magneto-optics for telecommunications and photonics.

**Key words:** magneto-optical phenomena, Faraday rotation angle, ellipticity angle.

## 1. Введение

Исследование магнитооптических эффектов и нелинейных оптических эффектов в нано-размерных фотонных кристаллах является одной из актуальных проблем физики магнитных явлений. В том числе, разработка способов увеличения величины угла поворота плоскости поляризации – эффекта Фарадея, представляет важный научный и практический интерес [1,2].

В настоящей работе анализированы спектральные свойства, т.е. частотные зависимости разностей показателей преломления и коэффициентов поглощения диэлектрических кристаллов, которыми определяются характеристики магнитооптических явлений. Изучены также спектральные особенности эффекта Фарадея, а также дисперсионные свойства магнитного кругового дихроизма. Указанные исследования обусловлены тем, что в современной наноэлектронике и нанопизике имеется большая потребность в материалах (или структурах) с частотно управляемыми магнитооптическими свойствами [3,4].

## 2. Спектральные особенности эффекта Фарадея

Изучения спектральных свойств величины угла поворота плоскости поляризации  $\varphi_F$ , т.е. фарадеевского угла вращения, будем проводить на основе следующего выражения [5]

$$\varphi_F = \frac{\omega d}{2c} \operatorname{Re}(n^- - n^+). \quad (1)$$

Здесь  $n^- - n^+$  - разность комплексных показателей преломления лево и право циркулярно-поляризованного света (или электромагнитной волны), которая определяется следующим образом [6]

$$n^- - n^+ = \frac{Ne^2}{2\epsilon_0} \cdot \frac{A_1 - iA_2}{A_1^2 + A_2^2} \cdot 2eB\omega. \quad (2)$$

В вышеприведённых выражениях:  $\omega$  – циклическая частота светового поля,  $c$  – скорость света в вакууме,  $\epsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума,  $N$  – концентрация электронов,  $e$  – величина элементарного заряда,  $B$  – индукция приложенного магнитного поля  $\vec{B}(0,0,B)$ ,  $d$  – толщина диэлектрического слоя.

Частотно зависимые функции  $A_1$  и  $A_2$  имеют вид [6]

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= m^2\omega^4 - \omega^2(2am + e^2B^2 + b^2) + a^2, \\ A_2 &= 2b\omega(a - m\omega^2). \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

здесь:  $m$  – масса электрона,  $a$  – эффективный коэффициент упругости,  $b$  – эффективный коэффициент сопротивления, которыми определяются следующие характерные циклические частоты рассматриваемой системы

$$\omega_c = \sqrt{\frac{a}{m}}, \quad \omega_3 = \frac{b}{m} \quad (4)$$

где  $\omega_c$  – циклическая частота собственных колебаний электронов,  $\omega_3$  – циклическая частота затухания света.

Отметим, что ранее в работе [6] было показана возможность резонансного усиления эффекта Фарадея при  $\omega = \omega_c$  действием небольшого внешнего магнитного поля. Здесь же будем изучать другой аспект этой проблемы, а именно: особенности частотной зависимости фарадеевского угла вращения  $\varphi_F$  с учётом поглощения света. Из-за сложной зависимости функций  $A_1$  и  $A_2$ , даваемых выражениями (3), аналитическое рассмотрение исследуемой проблемы в общем случае представляется невозможным.

Поэтому ниже мы ограничиваемся исследованием частных случаев, где всё-таки удаётся изучать спектральные особенности фарадеевского угла вращения  $\varphi_F$  аналитическим образом. Действительно, если наложить условия

$$\left. \begin{aligned} a &\cong eB\omega \\ b &= eB \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

то действительная часть разности комплексного показателя преломления можно записать в упрощённом виде

$$\operatorname{Re}(n^- - n^+) = \frac{Ne^2}{\varepsilon_0} \cdot \frac{eB}{\omega} \cdot \frac{u^2 - 2e^2 B^2}{u^4 + 4e^4 B^4}. \quad (6)$$

Здесь мы ввели следующее обозначение

$$u = m\omega - eB = m(\omega - \omega_n). \quad (7)$$

Величина  $\omega_n$  есть циклическая частота прецессии электронов под действием внешнего магнитного поля

$$\omega_n = \frac{eB}{m}. \quad (8)$$

Таким образом, при выполнении дополнительных условий (5), учитывая выражения (1), (6) для частотной зависимости фарадеевского угла вращения  $\varphi_F$  получаем следующее выражение

$$\varphi_F = \frac{d}{2c} \cdot \frac{Ne^2}{\varepsilon_0} \cdot eB \cdot \frac{u^2 - 2e^2 B^2}{u^4 + 4e^4 B^4}. \quad (9)$$

Далее, вычисляя производную функции  $\varphi_F$  фарадеевского угла вращения и приравняв её нулю, находим, что имеется две экстремальные частоты

$$\omega_1 = \omega_n, \quad \omega_2 = \left(1 + \sqrt{2(1 + \sqrt{2})}\right)\omega_n. \quad (10)$$

Первой экстремальной частоте соответствует минимум этой функции

$$\varphi_F(\min) = \frac{d}{4c} \cdot \frac{Ne^2}{\varepsilon_0} \left(-\frac{1}{eB}\right). \quad (11)$$

Во второй экстремальной частоте  $\varphi_F$  имеет следующее своё максимальное значение

$$\varphi_F(\max) = \frac{d}{4c} \cdot \frac{Ne^2}{\varepsilon_0} \cdot \frac{1}{eB} \cdot \frac{1}{\sqrt{2} \left[ 1 + (1 + \sqrt{2})^2 \right]}. \quad (12)$$

Существует также промежуточная частота  $\omega^* = (1 + \sqrt{2})\omega_n$ , при которой  $\varphi_F$  равна нулю.

Следовательно, график фарадеевского угла вращения  $\varphi_F$  от частоты можно представить следующим образом (рис.1)

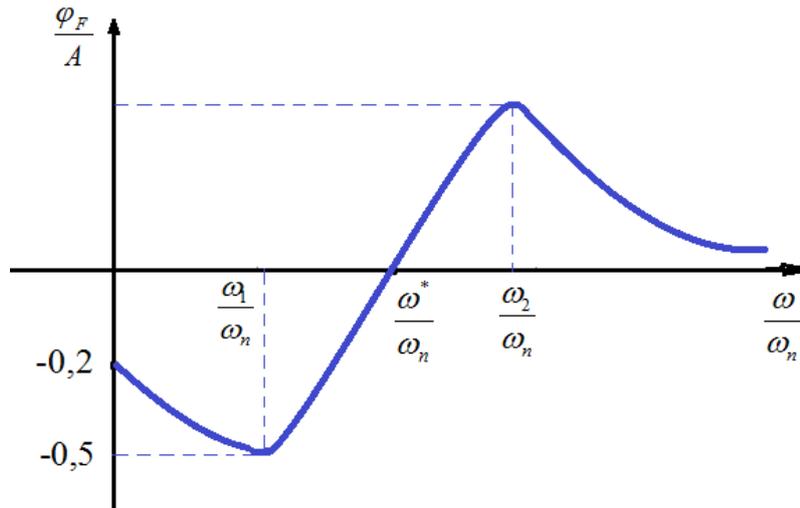


Рис. 1. Частотная зависимость фарадеевского угла вращения.

Как следует из вышеприведенного анализа, характерная величина фарадеевского угла вращения определяется следующим выражением

$$A = \frac{d}{4c} \cdot \frac{Ne^2}{\varepsilon_0 b} \equiv \frac{d\omega_{эл}}{4c} \cdot \frac{\omega_{эл}}{\omega_3}. \quad (13)$$

Здесь

$$\omega_{эл} = \sqrt{\frac{Ne^2}{m\varepsilon_0}} \quad (14)$$

- электронная плазменная частота.

Согласно экспериментальным данным [1,7,8] отношение частоты затухания света и частоты собственных колебаний электронов  $\omega_3/\omega_c \approx 10^{-3} - 10^{-2}$ . Следовательно, в указанных условиях, как следует из выражения (13) можно значительно, увеличить угол фарадеевского вращения.

Если диэлектрическая среда обладает поглощением, как в нашем случае, то коэффициенты поглощения право и лево циркулярно-поляризованных световых волн различаются. Это приведёт к тому, что после прохождения такой среды линейно поляризованная волна становится эллиптически поляризованной. Аналогично углу Фарадея, она характеризуется углом эллиптичности (или ориентации), которая определяется мнимой частью разности комплексного коэффициента преломления

$$\psi_E = \frac{\omega d}{2c} \operatorname{Im}(n^- - n^+) \quad (15)$$

Следующий раздел посвящен анализу частотной зависимости угла эллиптичности  $\psi_E$  или явления магнитного кругового дихроизма.

### 3. Дисперсионные свойства магнитного кругового дихроизма

Здесь будем изучать дисперсионные свойства т.е. частотную зависимость функции  $\psi_E$ , которая является количественной характеристикой явления магнитного кругового дихроизма. В том же приближении, которое было использовано в предыдущем разделе, на основе выражений (2) и (15) получаем

$$\psi_E = \frac{\omega d}{2c} \operatorname{Im}(n^- - n^+) = \tilde{B} \cdot \frac{u}{u^4 + 4e^4 B^4}. \quad (16)$$

Здесь

$$\tilde{B} = \frac{d}{c} \cdot \frac{Ne^2}{\varepsilon_0} \cdot 2ebB, \quad u = m\omega - eB. \quad (17)$$

Теперь находя производную функции  $\psi_E$  по частоте  $\omega$  и приравняв её нулю, приходим к выводу, что она имеет наибольшее значение при экстремальной частоте

$$\omega = \left(1 + \sqrt[4]{\frac{4}{3}}\right) \omega_n \quad (18)$$

Напомним, что здесь  $\omega_n$  – циклическая частота прецессии электронов под действием приложенного внешнего магнитного поля. Угол эллиптичности обращается в нуль при частоте света равной  $\omega_n$  (рис.2)

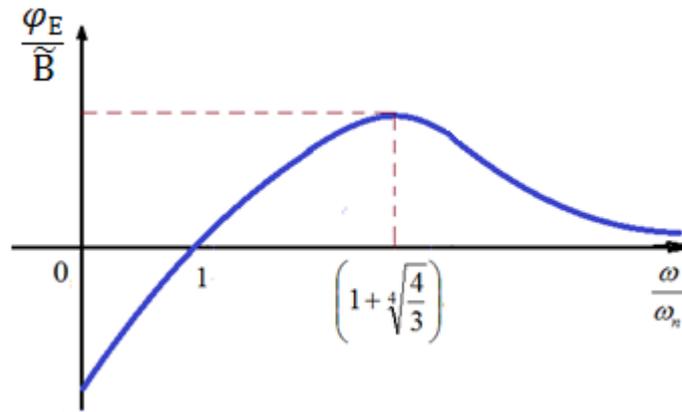


Рис.2. Дисперсионная кривая угла эллиптичности.

Нетрудно убедиться в том, что максимум угла эллиптичности тоже обратно пропорционально циклической частоте затухания света (смотрите выражение (13)).

В конце раздела приведём характерные значения используемых величин для исследуемых магнитооптических эффектов. Для оценки примем, что характерная величина угла фарадеевского вращения  $A$ , определяемая выражением (13) равна  $\pi$ . Тогда учитывая экспериментальные данные [1]:  $N=10^{28} \text{ m}^{-3}$ ,  $d \approx 20 \text{ нм}$  получаем, что  $B \approx 1 \text{ мТл}$ . Следовательно, частота прецессии равная согласно, второму условию (5) частоте затухания электромагнитных волн будет порядка  $200 \text{ МГц}$ , что согласуется с экспериментальными результатами [7,8].

### Заключение

Обобщая результаты полученных при анализе частотных зависимостей фарадеевского угла вращения и угла эллиптичности, можно прийти к выводу, что их максимальные значения обратно пропорциональны циклической частоте затухания электронной волны. Следовательно, при малых поглощениях удаётся существенно увеличить величины исследуемых магнитооптических явлений. Мы предполагаем, что и нелинейно-оптические эффекты, которые можно проанализировать в следующих порядках разложения по интенсивности волны, также будут испытывать аномалии.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта ОТ-Ф2-64.

## Литература

1. Belotelov V.I., Akimov I.A., Pohl M., Kotov V.A., Kasture S., Vengurlekar A.S., Achanta Venu Gopal, Yakovlev D.R., Zvezdin A.K., Bayer M. Enhanced magneto-optical effects in magnetoplasmonic crystals. *Nature Nanotechnology*. 2011. Vol. 6. P. 370-376.
2. Gan'shina E.A. Optical and magneto-optical properties of multilayer and granular films. In: *Nato ASI Series Frontiers in Magnetismol Reduced Dimension Systems*. Kluwer Academic Publ. 1998, P.397-432.
3. Шавров В.Г., Щеглов В.И. Динамика намагниченности в условиях изменения её ориентации. - М.: Физматлит, 2019, 472 с.
4. Шавров В.Г., Бучельников В.Д., Бычков И.В. Связанные волны в магнетизме. - М.: Физматлит, 2019, 480 с.
5. Ахманов С.А., Никитин С.Ю. Физическая оптика. – М.: Наука, 2004, 654 с.
6. Жумаев М.Р., Шарипов М.З. Резонансное усиление эффекта Фарадея в диэлектрических многослойных наноструктурах. *Вестник Челябинского государственного университета*. 2015. № 22 (377). Физика. Вып. 21. С. 83-88.
7. В.Е. Буранцов, Е.А. Ганьшина, В.С. Гушин, С.И. Касаткин, А.М. Муравьёв, Н.В. Плотникова, Ф.А. Гудонин. Магнитные и магнитооптические свойства многослойных наноструктур ферромагнетик–полупроводник. *ФТТ*. 2004. Т. 46 (5) P. 864.
8. Grunin, A. A., Zhdanov, A. G., Ezhov, A. A., Ganshina, E. A., & Fedyanin, A. A. Surface-plasmon-induced enhancement of magneto-optical Kerr effect in all-nickel subwavelength nanogratings. *Applied Physics Letters*. 2010. V. 97(26). P. 261908.

**Для цитирования:**

Жумаев М.Р., Шарипов М.З., Коледов В.В., Шавров В.Г. Частотная зависимость магнитооптических явлений в диэлектрических наноструктурах. *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. 2020. № 1. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jan20/5/text.pdf>. DOI 10.30898/1684-1719.2020.1.5