

УДК 537.632

РЕЗОНАНСНОЕ УСИЛЕНИЕ МАГНИТООПТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ В ОДНОМЕРНЫХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛАХ

А.Н. Калиш, В.И. Белотелов

Аннотация

В работе исследуются оптические свойства магнитных фотонных кристаллов, обладающих структурными дефектами. Получены соотношения, позволяющие моделировать свойства одномерных фотонных кристаллов. Показано, что рассматриваемые структуры имеют резонансы внутри запрещенной зоны. Приведена картина распределения электрического поля внутри фотонного кристалла. Исследовано влияние намагниченности на резонансные свойства. Рассмотрены преимущества использования наклонного падения света.

Фотонные кристаллы – это материалы, оптические свойства которых модулированы в пространстве, причем период модуляции сравним с длиной волны используемого электромагнитного излучения. Многократная интерференция от границ слоев приводит к образованию запрещенных зон – диапазонов частот, для которых распространение волн в фотонном кристалле запрещено. Благодаря своим свойствам, связанным с особенностями распространения света, дисперсией и анизотропией, фотонные кристаллы могут находить широкие применения в прикладных задачах интегральной оптики, а именно в качестве оптических фильтров, отражателей, поляризаторов, суперпризм, демультимплексоров, а также преобразователей частоты за счет нелинейных явлений. Введение точечных и линейных пространственных дефектов приводит к возможности создания высокоэффективных лазеров и волноводов [1]. Использование магнитных материалов, с одной стороны, позволяет управлять оптическими свойствами фотонных кристаллов (например, положением и шириной запрещенной зоны), а с другой стороны, приводит к появлению эффектов магнитооптики, в частности, эффекта Фарадея – вращения плоскости поляризации линейно поляризованного света при наличии внешнего магнитного поля [2]. Таким образом, магнитные фотонные кристаллы могут находить применения как преобразователи поляризации света, оптические изоляторы, модуляторы, затворы.

По своей структуре фотонные кристаллы могут быть одно-, двух- или трехмерными. В данной работе рассматриваются одномерные магнитные фотонные кристаллы, представляющие собой последовательность чередующихся магнитных и немагнитных слоев. Наличие структурных дефектов приводит к появлению внутри запрещенной зоны резонансного уровня, на котором наблюдается сильное увеличение коэффициента прохождения и усиление эффекта Фарадея.

В общем виде влияние магнитного поля заключается в том, что зависимость вектора электрической индукции от напряженности электрического поля в магнитной среде приобретает вид

$$\mathbf{D} = \varepsilon \cdot \mathbf{E} + b \cdot (\mathbf{E} - (\mathbf{m} \cdot \mathbf{E}) \cdot \mathbf{m}) + ig \cdot [\mathbf{m} \times \mathbf{E}],$$

где \mathbf{m} – единичный вектор намагниченности, g – гирация, b – постоянная Коттон–Мутона, причем g и b зависят от намагниченности и обращаются в нуль при отсутствии внешнего магнитного поля. В частности, если намагниченность направлена вдоль оси z , то тензор диэлектрической проницаемости имеет вид

$$\hat{\varepsilon}_m = \begin{pmatrix} \varepsilon + b & -ig & 0 \\ ig & \varepsilon + b & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Гирация является линейной функцией по намагниченности, а постоянная Коттон–Мутона – квадратичной. Для обычно используемых магнитных материалов (например, железо-иттриевых гранатов) квадратичными магнитооптическими эффектами можно пренебречь по сравнению с линейными. Поэтому при вычислениях постоянная Коттон–Мутона принималась равной нулю.

Наличие недиагональных компонентов тензора диэлектрической проницаемости и приводит к эффекту Фарадея. В частности, если свет распространяется вдоль направления намагниченности, то показатели преломления для волн с разными круговыми поляризациями составляют $n_+ = \sqrt{\varepsilon + g}$ и $n_- = \sqrt{\varepsilon - g}$. Приобретая разность фаз, при сложении они дают линейную поляризацию, повернутую относительно исходной на угол

$$\theta_F = \frac{n_+ - n_-}{2} \frac{\omega}{c} d,$$

где d – толщина магнитного слоя, ω – частота волны, c – скорость света в вакууме.

Для определения характеристик отраженного и прошедшего света разработан метод, основанный на том, что внутри каждого слоя независимо друг от друга распространяются четыре волны – нормальные моды, характеризующиеся определенными направлением распространения и поляризацией [3]. Из амплитуд нормальных мод можно определить декартовы составляющие полей для отраженной и прошедшей волн, а из них, в свою очередь, – характеристики волн: коэффициенты прохождения и отражения, углы Фарадея и эллиптичности прошедшего и отраженного света. Кроме того, данный метод позволяет получить картину распределения поля в структуре и дисперсионные зависимости.

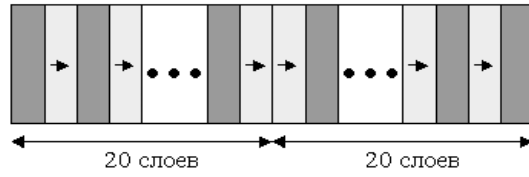
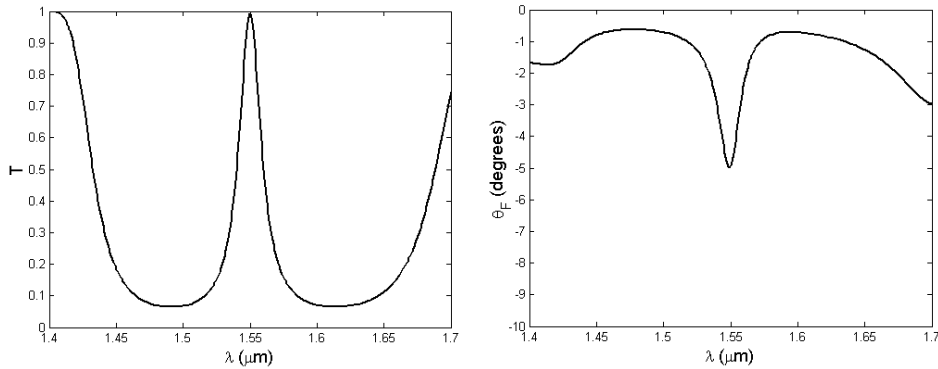
Для нахождения нормальных мод введем систему координат так, что ось z направлена перпендикулярно границам слоев, а плоскостью падения является плоскость Oyz . Пусть намагниченность в магнитных слоях направлена вдоль оси z . Тогда тензор диэлектрической проницаемости для магнитных слоев имеет вид (1), а для нормальных мод получены соотношения

$$n_y = \sqrt{\varepsilon_{\text{ext}}} \sin \theta, \quad n_{z\pm}^2 = \varepsilon - \frac{n_y^2}{2} \left(\frac{b + 2\varepsilon}{b + \varepsilon} \right) \pm \sqrt{\frac{n_y^4}{4} \left(\frac{b}{\varepsilon + b} \right)^2 + g^2 \left(1 - \frac{n_y^2}{\varepsilon + b} \right)},$$

$$e_x = -\frac{ig}{n_z^2 + n_y^2 - (\varepsilon + b)} e_y, \quad e_z = \frac{n_y n_z}{n_y^2 - \varepsilon} e_y, \quad \mathbf{h} = \frac{\mathbf{n} \times \mathbf{e}}{|\mathbf{n}|}$$

где $\mathbf{n} = \frac{c}{\omega} \mathbf{k}$, \mathbf{k} – волновой вектор, ε_{ext} – диэлектрическая проницаемость внешней среды, θ – угол падения света, \mathbf{e} , \mathbf{h} – единичные векторы напряженности электрического и магнитного полей для нормальных мод. В немагнитном слое $n_z^2 = \varepsilon - \sin^2 \theta$, где ε – диэлектрическая проницаемость, а в качестве нормальных мод можно выбрать линейные s - и p -поляризации, для которых единичные векторы напряженности электрического и магнитного полей имеют вид

$$\mathbf{e}_s = (1, 0, 0), \quad \mathbf{e}_p = \left(0, \frac{n_z}{\sqrt{\varepsilon}}, -\frac{n_y}{\sqrt{\varepsilon}} \right), \quad \mathbf{h}_{s,p} = \frac{\mathbf{n} \times \mathbf{e}_{s,p}}{|\mathbf{n}|}$$

Рис. 1. Структура $(NM)^{10}(MN)^{10}$ Рис. 2. Зависимость коэффициента прохождения и угла Фарадея от длины волны при нормальном падении света для структуры $(NM)^{10}(MN)^{10}$

Для определения характеристик прошедшей волны введем новую систему координат так, чтобы ось x' была параллельна вектору электрического поля падающей волны, а ось z' – волновому вектору прошедшей волны. Тогда для коэффициента прохождения, угла Фарадея и коэффициента эллиптичности справедливы формулы

$$T = |E_{x'}|^2 + |E_{y'}|^2, \quad \theta_F = \text{Re arctg } \chi, \quad \text{tg } \delta = \text{th Im arctg } \chi,$$

где $\chi = E_{y'}/E_{x'}$.

Аналогичным способом можно вычислять характеристики отраженной волны. Таким образом, разработанный метод позволяет исследовать оптические свойства фотонных кристаллов при наклонном падении света.

Рассматриваемые фотонные кристаллы представляют собой последовательность чередующихся магнитных и немагнитных слоев. Пример подобной структуры приведен на рис. 1, причем эта структура обладает дефектом, а именно пропущенным немагнитным слоем в середине. Толщины слоев составляют $\lambda/4$ для длины волны 1.55 мкм. Параметры слоев подобраны таким образом, что немагнитные слои соответствуют гадолиний-галлиевому гранату ($\varepsilon = 3.71$), а магнитные – церий-замещенному железиттриевому гранату ($\varepsilon = 4.884$, $b = 0$, $g = 0.009$).

Как показано на рис. 2, наличие структурного дефекта приводит к возникновению резонанса внутри запрещенной зоны, который характеризуется максимальным значением угла Фарадея и коэффициентом прохождения, равным единице. Расчеты показывают, что максимальное значение угла Фарадея здесь составляет около 5° , в то время как для однородной магнитной среды такой же толщины оно равняется 1.7° , что свидетельствует о преимуществе периодических структур по сравнению с однородными. Изменение количества дефектов приводит к изменению формы резонанса. Кроме того, показано еще одно свойство магнитных фотонных

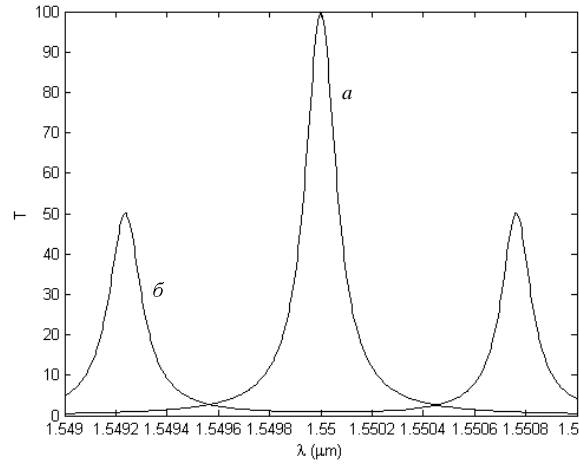


Рис. 3. Зависимость коэффициента прохождения от длины волны для структуры $(NM)^{10}(MN)^{10}$ при отсутствии (а) и наличии (б) намагнитченности

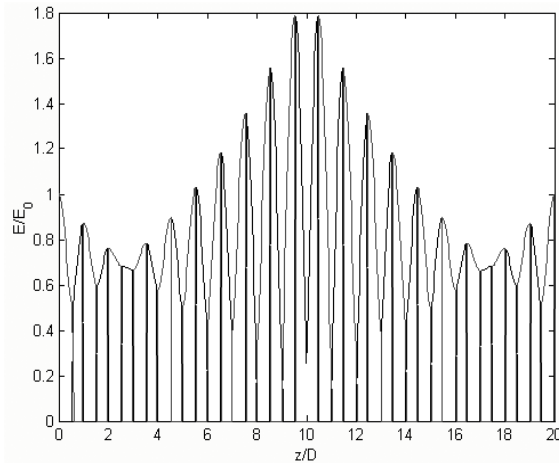


Рис. 4. Распределение поля на рабочей длине волны для структуры с дефектом

кристаллов, справедливое и для структур без дефектов: на одном из краев запрещенной зоны значение угла Фарадея больше, чем на другом. Это связано с тем, что на одном краю электромагнитное поле сосредоточено преимущественно в магнитных слоях, а на другом – в немагнитных.

Исследование влияния намагнитченности на резонансные явления в запрещенной зоне приводит к следующим результатам. При распространении волны внутри магнитного фотонного кристалла она распадается на две циркулярно-поляризованные моды, резонансные длины волн которых, вообще говоря, различны. А именно, они отличаются от рабочей длины волны λ_0 на величину

$$\Delta\lambda = \pm\lambda_0 \frac{g}{2\varepsilon_M} \frac{\sqrt{\varepsilon_N}}{\sqrt{\varepsilon_N} + \sqrt{\varepsilon_M}},$$

что составляет порядка 1 нм. При низкой добротности структуры (то есть при малом количестве периодов) эти резонансы перекрываются, и в результате получается один широкий резонанс, и на рабочей длине волны имеется максимум

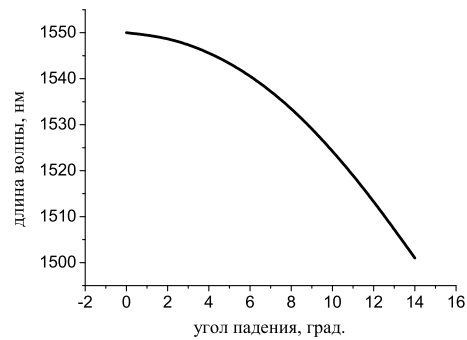


Рис. 5. Зависимость резонансной длины волны от угла падения

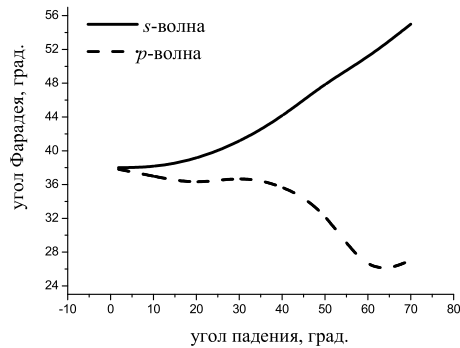


Рис. 6. Зависимость максимального угла Фарадея от угла падения

коэффициента прохождения. Однако при увеличении числа периодов в структуре ширина резонансов становится уже, они перестают перекрываться, и на рабочей длине волны, которая расположена между ними, имеется минимум коэффициента прохождения. В то же самое время в этих резонансах (то есть при длинах волн $\lambda_0 \pm |\Delta\lambda|$) величина коэффициента прохождения составляет 50%, так как резонанс имеет место для одной из двух мод. Численный эксперимент подтверждает эти рассуждения (рис. 2, 3). Примечательно, что расстояние между резонансами растет с увеличением намагниченности.

Картина распределения поля на резонансной длине волны имеет характерный вид, показанный на рис. 4. В основном поле концентрируется вблизи дефекта, поэтому амплитуда поля внутри структуры оказывается в несколько раз больше амплитуды падающей волны. Картина симметрична относительно дефекта, что и обеспечивает почти полное прохождение.

Использование геометрии наклонного падения света открывает новые возможности фотонных кристаллов, а именно: простой способ перестройки резонансной длины волны за счет изменения оптической длины пути, управление поляризацией света за счет различий характеристик s - и p -волн, способ создания модулятора за счет зависимости коэффициента прохождения от угла падения, эффект демультимплексирования за счет дисперсии. В качестве примера на рис. 5 показана зависимость резонансной длины волны от угла падения, а на рис. 6 – зависимость резонансного значения угла Фарадея от угла падения. Примечательно, что для одного типа поляризации падающего света эффект Фарадея усиливается, а для

другого – уменьшается. Таким образом можно осуществлять управление эффектом Фарадея и состоянием поляризации прошедшей волны.

Полученные результаты свидетельствуют:

- о преимуществах фотонных кристаллов по сравнению с однородной средой;
- о возможности простой перестройки рабочей длины волны фотонного кристалла;
- о возможности усиления эффекта Фарадея при использовании наклонного падения света.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 05-02-17308, 05-02-17064).

Summary

A.N. Kalish, V.I. Belotelov. Resonant enhancement of magneto-optical effects in one-dimensional photonic crystals.

In the paper optical properties of magnetic photonic crystals with structural defects are investigated. Relations that allow modelling of one-dimensional photonic crystal's properties are derived. It is shown that structures under consideration possess resonances inside a bandgap. A graph of electric field distribution inside a photonic crystal is given. An influence of magnetization on resonant properties. The advantages of using oblique incidence of light are also considered.

Литература

1. *Monat C., Seassal C., Letartre X. et al.* InP based photonic crystal microlasers on silicon wafer // *Physica E.* – 2003. – V. 17. – P. 475–476.
2. *Levy M., Yang H.C., Steel M.J., Fujita J.* Flat-top response in one-dimensional magnetic photonic bandgap structures with Faraday rotation enhancement // *J. Lightwave Technol.* – 2001. – V. 19. – P. 1964–1969.
3. *Hamrle J.* Magneto-optical determination of the in-depth magnetization profile in magnetic multilayers. – Paris, 2003. – 200 p.

Поступила в редакцию
21.02.06

Калиш Андрей Николаевич – студент кафедры радиофизики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

E-mail: a_kalish@mail.ru

Белотелов Владимир Игоревич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник кафедры радиофизики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.