

## ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

### МАГНИТООПТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТОК, СВЯЗАННЫЕ С АНОМАЛИЯМИ РЭЛЕЯ-ВУДА И ВОЗБУЖДЕНИЕМ ПЛАЗМОНОВ

*В.И. Белотелов<sup>1,2</sup>, Е.А. Безус<sup>3,4</sup>, Д.А. Быков<sup>3,4</sup>, Л.Л. Досколович<sup>3,4</sup>, В.А. Котов<sup>4</sup>, А.К. Звездин<sup>4</sup>*

<sup>1</sup>*Московский государственный университет, Москва, Россия,*

<sup>2</sup>*Институт общей физики РАН, Москва, Россия,*

<sup>3</sup>*Институт систем обработки изображений РАН, Самара, Россия,*

<sup>4</sup>*Самарский государственный аэрокосмический университет, Самара, Россия*

#### *Аннотация*

Исследованы резонансные магнитооптические свойства субволновых металлических дифракционных решеток на подложке из равномерно намагниченного диэлектрика. Особое внимание уделено аномалиям Рэля-Вуда. Установлено, что на частотах возбуждения поверхностного плазмона наблюдается резонанс угла Фарадея. Показана возможность влияния на магнитооптические эффекты посредством использования наноструктур.

#### *Введение*

В настоящее время наблюдается рост интереса к магнитооптике. Это обусловлено как развитием технологий производства магнитных материалов, так и необходимостью новых механизмов для эффективного управления параметрами электромагнитного излучения. Новые магнитооптические материалы могут найти применение в оптических изоляторах, модуляторах света, оптических затворах и других приборах [1]. Для изготовления подобных устройств необходимо контролировать и изменять магнитооптические свойства материалов. Обычно это достигается путем надлежащего выбора их химического состава. Допирование гранатов иттрия и гадолиния висмутом или другими редкоземельными металлами позволяет усилить некоторые магнитооптические электронные переходы, благодаря чему возможно увеличение константы Фарадея на порядок. Так, для магнитной пленки из  $Bi_{1,6}Gd_{1,4}(FeAlGa)_5O_{12}$  эффект Фарадея составляет 5 град/мм при длине волны 600 нм [2]. Оптические потери при этом невелики. Однако применение данного подхода связано с рядом существенных ограничений. Поглощение света возрастает с увеличением константы Фарадея. Кроме того, значение эллиптичности прошедшей волны зачастую оказывается высоким, что делает материал неприемлемым для практических приложений.

Существует другой способ воздействия на магнитооптические свойства материалов. Оптические свойства материалов могут быть изменены путем изготовления из них наноструктур. Как правило, под этим подразумевают создание на поверхности или внутри диэлектрической или металлической пленки периодической структуры, образованной субволновыми отверстиями или штрихами. Например, перфорированная серебряная пленка с субволновыми отверстиями обладает эффектом экстраординарного пропускания света (ЭПС), в то время как такая же пленка без отверстий не обладает подобным свойством [3]. В большинстве теоретических исследований, посвященных эффекту ЭПС, утвержда-

ется, что поверхностные плазмоны (ПП) – совместные колебания электронной плазмы и фотонов вблизи металлической поверхности (см., например, [4]) – играют важную роль в возникновении экстраординарного пропускания. Несмотря на то, что степень влияния ПП на эффект ЭПС все еще до конца не ясна, их присутствие позволяет рассматривать упомянутые структуры как плазмонные системы. Помимо ПП, в ЭПС могут быть задействованы некоторые другие типы волн с малой групповой скоростью, например волноводные моды, характерные для перфорированных пленок [5, 6].

Эффективное возбуждение ПП возможно благодаря периодическому наноструктурированию материала. При его отсутствии не будет наблюдаться резонансное поведение оптических свойств, поскольку соответствующая область спектра входного возбуждающего оптического сигнала не будет включать частоту колебаний плазмы в металле. Аналогичные эффекты могут также быть присущи магнитооптическим свойствам наноструктурированного материала. Наноструктурированные магнитные материалы активно исследуются в последние годы. Прежде всего, были исследованы магнитные фотонные кристаллы – прозрачные системы из диэлектрика с чередующимися намагниченными и ненамагниченными частями [7]. Появление выраженных максимумов угла Фарадея в фотонных кристаллах связано с конструктивной интерференцией электромагнитных волн на границах раздела между материалами, составляющими кристалл. Плазмонные структуры, состоящие из магнитных материалов, были рассмотрены в нескольких работах [8-15].

Влияние резонансов, связанных с локализацией волн, на магнитооптические свойства структур может быть двояким и иметь квантово-механическую или электромагнитную природу. В первом случае ПП могут влиять на магнитооптические переходы в магнитном материале, во втором – могут привести к увеличению пути распространения волны в намагниченном материале, что в свою очередь приведет к усилению магнитооптических эффектов, например, увеличению значения угла Фарадея.

Первый вид влияния характерен для наночастиц. Типичный пример рассмотрен в работе [15], в которой был экспериментально исследован полярный магнитооптический эффект Керра в тонких пленках из железиттриевого граната, содержащих наночастицы из золота. Было показано, что присутствие наночастиц приводит к изменению знака угла Керра в области длин волн, в которой находится плазмонный резонанс наночастиц. В качестве объяснения было предложено влияние ПП на магнитооптические эффекты в силу того, что поле электромагнитной волны в ближней зоне оказывает существенное влияние на спин-орбитальное взаимодействие.

В настоящей работе рассматривается второй случай, когда воздействие имеет исключительно электромагнитную природу и не связано с изменениями напряженности электронных переходов. На данный момент этот тип влияния рассмотрен всего в нескольких работах [8-14]. В работе [10] было исследовано прохождение света через перфорированную металлическую пленку при наличии внешнего магнитного поля. Было показано, что положение максимума коэффициента пропускания, соответствующего эффекту ЭПС, в значительной степени зависит от направления и амплитуды внешнего магнитного поля. В работе [11] были описаны эксперименты с перфорированными пленками, изготовленными из кобальта. Магнитооптический эффект Керра в области экстраординарного пропускания для такой структуры оказался на порядок меньше, чем для однородной пленки той же толщины. Авторами работ [12-14] была рассмотрена двухслойная структура, состоящая из тонкой периодически перфорированной золотой пленки, расположенной на однородном намагниченном диэлектрическом слое. В отличие от результатов исследования кобальтовых пленок было обнаружено резонансное увеличение значения угла Фарадея, сопровождающееся увеличением пропускания. Было показано, что надлежащий выбор геометрических параметров структуры позволяет совмещать эффекты ЭПС и резонансного увеличения угла Фарадея для длин волн в ближней инфракрасной части спектра. Было предложено качественное объяснение возникающих эффектов, связанное с волноводным распространением излучения в намагниченном слое.

Оптические свойства описанной системы, состоящей из перфорированной металлической пленки и диэлектрического слоя, в большей степени обусловлены возбуждением волноводных мод в диэлектрическом слое. Влияние ПП, возникающих на границе металл-диэлектрик, сравнительно мало. Чтобы изучить влияние ПП, рассмотрим структуру, состоящую из одномерной дифракционной решетки, расположенной на толстой магнитной подложке (рис. 1). Вектор намагниченности направлен по нормали поверхности подложки. Выбранная структура лишена волноводных свойств, что позволяет исключить влияние мод на свойства системы.

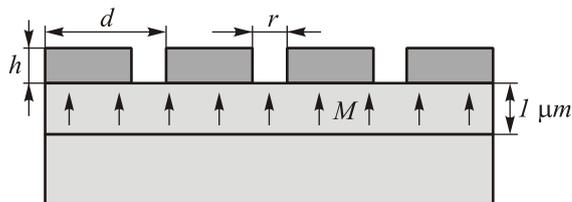


Рис. 1. Рассматриваемая структура

Подобные системы с немагнитной подложкой хорошо изучены. В частности, оптические свойства таких систем, связанные с аномалиями Рэлея-Вуда, рассмотрены в работах [16-23, 27, 28]. Первые результаты принадлежат Вуду, который в 1902 году обнаружил минимумы и максимумы спектра отражения металлической решетки [16]. Первые попытки объяснения этих аномалий были предприняты Рэлеем, который предсказал частоты, при которых они возникают. Для решеток из идеально-проводящего материала Рэлей теоретически обнаружил сингулярности электромагнитного поля в случае, когда один из порядков дифракции становится параллельным поверхности решетки, что вызывает перераспределение энергии между другими незатухающими порядками дифракции. Позднее Фано показал, что обнаруженные аномалии делятся на два типа: аномалии, связанные с исчезновением порядка дифракции (аномалии Рэлея-Вуда), и резонансные аномалии [18]. Последние связаны с резонансным эффектом, возникающим при согласовании затухающего порядка дифракции с собственной модой решетки. В случае металлической решетки на диэлектрической подложке это соответствует возбуждению ПП, поэтому аномалии такого типа называются плазмонными. В зависимости от параметров решетки оба вида аномалий могут проявляться как отдельно, так и вместе [19]. Они связаны с локальными особенностями электромагнитного поля в области решетки, и, следовательно, должны в случае наличия намагниченной подложки оказывать влияние на магнитооптические свойства системы. Исследованию этого влияния и посвящена данная работа.

### Метод расчета

Исследование магнитооптических свойств рассматриваемой структуры (рис. 1) было основано на решении задачи дифракции электромагнитной волны на структуре в рамках электромагнитной теории. Уравнения Максвелла для магнитной структуры с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon(\mathbf{r})$  и намагниченностью  $\mathbf{g}(\mathbf{r})$  могут быть записаны в виде:

$$\left(\hat{H} + \hat{V} - k_0^2\right)\Psi(\mathbf{r}) = 0, \quad (1)$$

где  $\Psi(\mathbf{r}) = (\epsilon(\mathbf{r}))^{-1/2} \mathbf{E}(\mathbf{r})$ ,  $\mathbf{E}(\mathbf{r})$  – амплитуда электрического поля,  $k_0 = \omega/c$ ,

$$\hat{H}\Psi(\mathbf{r}) = (\epsilon(\mathbf{r}))^{-1/2} \nabla \times \left\{ \nabla \times (\epsilon(\mathbf{r}))^{-1/2} \Psi(\mathbf{r}) \right\};$$

$\hat{V}\Psi(\mathbf{r}) = -ik_0^2 \mathbf{g}(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{n} \times \Psi(\mathbf{r})$ ,  $\mathbf{n}$  – единичный вектор намагниченности среды. Будем считать, что  $\mu = 1$  и

намагниченная среда описывается следующим тензором диэлектрической проницаемости [2]:

$$\hat{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_2 & -ig & 0 \\ ig & \varepsilon_2 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Для решения задачи дифракции электромагнитной волны на данной структуре использовался метод связанных волн (rigorous coupled-wave analysis) [24, 25]. Данный метод решения уравнений Максвелла является разновидностью дифференциального метода и занимает лидирующие позиции по функциональным возможностям и широте использования. Решение задачи дифракции было основано на устойчивом алгоритме, предложенном в [24]. Дополнительно, при определении поля в каждом слое, использовались специальные правила для разложения в ряд Фурье произведения функций [25]. Применение этих правил позволяет достичь лучшей точности представления компонент электромагнитного поля отрезками рядов Фурье и является особенно актуальным при решении задачи дифракции на решетках, изготовленных из материалов с высокой проводимостью.

Определим длины волн, соответствующие аномалиям Рэлея-Вуда. Эти аномалии возникают, когда направление распространения одного из порядков дифракции параллельно поверхности решетки. Данное условие для порядка с номером  $m$  имеет вид:

$$\lambda_R = \frac{\sqrt{\varepsilon_2} d}{m} (\sin \varphi + 1), \quad (3)$$

где  $\varphi$  – угол падения.

Условия возникновения аномалий, связанных с волноводным распространением излучения, зависят от типа структура. В рассматриваемой структуре волноводное распространение излучения возможно только посредством возбуждения ПП. Возбуждение ПП происходит при следующих значениях длины волны:

$$\lambda_{SP} = \frac{\sqrt{\varepsilon_2} d}{m} (\sin \varphi + \alpha(\lambda)), \quad (4)$$

где  $\alpha(\lambda) = \sqrt{\varepsilon_1 / (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}$ ,  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  – диэлектрические проницаемости металла и диэлектрика соответственно. Отметим, что последнее выражение выполняется для плоской границы раздела двух полубесконечных сред и может быть применено к рассматриваемой структуре только приближенно. В большинстве случаев значение  $\alpha(\lambda)$  незначительно отличается от единицы, и значения  $\lambda_R$  и  $\lambda_{SP}$  близки друг к другу.

### Результаты расчета и обсуждение

Методом численного моделирования были исследованы две металлических дифракционные решетки – «решетка А» и «решетка В». Диэлектрик под решетками будем считать состоящим из двух слоев: намагниченного слоя толщиной 1 мкм и бес-

конечной немагнитной подложки. Оба слоя имеют одинаковую диэлектрическую проницаемость. Это позволяет исключить отражения на границе между слоями и, соответственно, волноводное распространение излучения в намагниченном слое. На практике такая диэлектрическая пленка может быть получена путем напыления двух слоев при различной температуре. Решетка А изготовлена из серебра и имеет следующие параметры: период  $d = 1620$  нм, ширина штрихов  $r = 172$  нм, высота штрихов  $h = 50$  нм. Диэлектрическая проницаемость намагниченного слоя под решеткой описывается тензором (2) при  $\varepsilon_2 = 2,31$  и  $g = 0,01$ . Решетка В изготовлена из золота и имеет следующие параметры:  $d = 800$  нм,  $r = 100$  нм,  $h = 50$  нм. Для магнитного слоя использовались значения  $\varepsilon_2 = 5,5$ ,  $g = 0,01$ , соответствующие материалу Bi:YIG (железтитриевый гранат, допированный висмутом). Этот материал является одним из наиболее распространенных материалов магнитооптики. Значения для диэлектрических проницаемостей золота и серебра были взяты из справочника [26].

На рис. 2 представлены зависимости коэффициента пропускания и угла Фарадея от длины волны. Для обеих решеток четко видны аномалии рассматриваемых величин. Резонансы угла Фарадея следуют за максимумами пропускания и наблюдаются в области, где пропускание уже относительно невелико. Все резонансы более ярко выражены для решетки А. Длины волн, соответствующие экстремумам пропускания и резонансам угла Фарадея, приведены в табл. 1. Также в таблице представлены длины волн (3) и (4), соответствующие аномалиям Рэлея-Вуда и условиям возбуждения плазмонов. Можно заметить, что максимумы пропускания находятся вблизи значений длин волн (3), соответствующих аномалиям Рэлея-Вуда, и сдвинуты относительно них на 1-20 нм в сторону больших длин волн. В то же время минимумы пропускания находятся достаточно близко к значениям длин волн возбуждения плазмона (4) и сдвинуты на 10-30 нм также в сторону больших длин волн. Значения, соответствующие резонансам угла Фарадея, практически точно совпадают с длинами волн, при которых достигается возбуждение плазмонов.

Для аналогичных систем связь между спектром пропускания и аномалиями Рэлея-Вуда была рассмотрена в [27, 28]. Однако остался спорный момент. Авторами [27] была указана связь особенностей спектра пропускания с аномалиями Рэлея и возбуждением плазмонов. При этом в [27] было отмечено точное совпадения соответствующих длин волн. Результаты, представленные на рис. 2 и в табл. 1, свидетельствуют о том, что в данном случае можно говорить лишь о корреляции между ними, но не о точном совпадении. Это утверждение согласуется с результатами работы [28].

Тем не менее, несомненно, что аномалии Рэлея-Вуда оказывают значительное влияние на оптические свойства металлических дифракционных решеток, и значения коэффициентов пропускания и отражения связаны с ними.

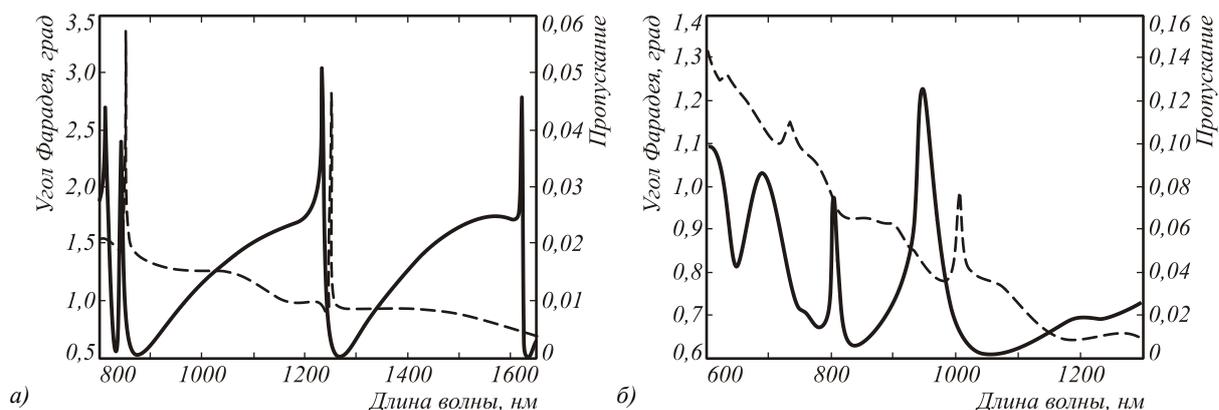


Рис. 2. Пропускание (сплошная линия) и угол Фарадея (пунктирная линия) для решетки А (а) и решетки В (б) (см. параметры в тексте статьи). Освещающий пучок соответствует нормально падающей плоской волне с ТМ-поляризацией

Таблица 1. Длины волн возбуждения плазмонов ( $\lambda_{SP}$ ), максимумы угла Фарадея ( $\lambda_1$ ), минимумы пропускания ( $\lambda_2$ ), длины волн аномалий Рэля ( $\lambda_3$ ), вычисленные для решётки А. В скобках:  $v/m$  – граница раздела металл/вакуум,  $m/d$  – металл/диэлектрик, числа в скобках – номера порядков для плазмонов и аномалий Рэля

$\lambda_{SP}$ (нм)	$\lambda_1$ (нм) – Fmax	$\lambda_2$ (нм) Tmin	$\lambda_R$ (нм)	$\lambda_3$ (нм) Tmax
Решетка А				
824 (2, v/m)	820	832	810 (2, v/m)	811
851 (3, m/d)	851	872	821 (3, m/d)	841
1252 (2, m/d)	1251	1266	1231 (2, m/d)	1233
1629 (1, v/m)	1629	1633	1620 (1, v/m)	1622
Решетка В				
738 (3, m/d)	736	782	-	-
814 (1, v/m)	811	839	800 (1, v/m)	806
1006 (3, m/d)	1007	1058	938 (2, m/d)	947

Представляет интерес тот факт, что резонансное увеличение угла Фарадея совпадает с условием возбуждения поверхностного плазмона на границе раздела между решеткой и подложкой. Увеличение угла Фарадея в металлических и диэлектрических дифракционных структурах уже рассматривалось в [12-14], где этот эффект был объяснен возбуждением волноводных мод в диэлектрическом слое. Также было показано, что значение угла Фарадея обратно пропорционально групповой скорости мод. Аналогичное объяснение можно применить и в рассматриваемом случае, если вместо волноводных мод рассматривать поверхностные плазмоны. Проведенный анализ рассматриваемой структуры также показал аналогичную зависимости от длины волны и обратную зависимость от групповой скорости. Это позволяет обобщить рассматриваемый эффект резонансного увеличения угла Фарадея на все металлodieлектрические структуры, в которых возбуждаются квазиволноводные или локализованные электромагнитные волны. Весьма вероятно возникновение аналогичного эффекта в полностью диэлектрических структурах. Поскольку плазмоны в них возбуждаться не могут, то увеличение угла Фарадея может быть достигнуто за счет возникновения волноводных мод.

Рассмотрим формы возникающих резонансов. Резонансы пропускания имеют ассиметричную форму. Обычно такие профили называются профилями Фано, в отличие от симметричных Лоренцевых профилей. Профили Фано возникают в случае, когда резонансные и нерезонансные процессы оказывают влияние друг на друга [18, 28]. В случае дифракционной решетки резонансный процесс связан с возбуждением одним из порядков собственных мод структуры, а нерезонансный – с дифракцией остальных порядков. В рассматриваемом случае сдвиг экстремумов пропускания от значений длин волн, соответствующих аномалиям Рэля и возбуждению плазмонов, объясняется взаимодействием резонансного и нерезонансного процессов. Форма профиля резонанса Фарадея имеет лоренцев вид в силу того, что главную роль в его образовании играет резонансный процесс. Этим объясняется точное совпадение максимумов угла Фарадея с длинами волн возбуждения плазмона.

Для практического применения данного эффекта важно сочетание большого значения угла Фарадея с относительно высоким значением пропускания. Это практически достижимо, поскольку минимум пропускания смещен относительно величин длин волн возбуждения плазмона (4), в то время как смещения резонанса угла Фарадея нет. Величина сдвига зави-

сит от относительной величины вклада нерезонансного процесса, и её значение можно изменять. Следовательно, возможно получить резонанс угла Фарадея при ненулевом существенно пропускании. Тем не менее, двухслойная металлодиэлектрическая решётка, рассмотренная в [12-14], более предпочтительна, поскольку позволяет обеспечить точное совпадение резонансов пропускания и резонансов угла Фарадея.

### Заключение

Были исследованы магнитооптические свойства металлических дифракционных решеток, расположенных на намагниченной диэлектрической подложке. Результаты численного моделирования показали, что указанные структуры обладают выраженными резонансами угла Фарадея при длинах волн, соответствующих условию возбуждения плазмонов. Максимумы и минимумы пропускания явно коррелированы с аномалиями Рэлея-Вуда и условием возбуждения плазмонов, но не точно совпадают с ними. Максимумы угла Фарадея имеют профиль Лоренца, что говорит об их резонансной природе. Увеличение угла Фарадея связывается с уменьшением групповой скорости мод системы решетка/подложка. Таким образом, резонансные магнитооптические эффекты в рассматриваемых структурах возникают по причине наноструктурирования и не связаны с магнитооптическими переходами в атомах.

### Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ 06-02-17507, 07-02-91588, 07-02-01445, 07-01-96602, 07-07-97601, 07-07-91580, российско-американской программы «Фундаментальные исследования и высшее образование» (грант CRDF RUX0-014-SA-06) и фонда «Династия».

### Литература

- Dötsch H., Bahlmann N., Zhuromskyy O. et. al. Applications of magneto-optical waveguides in integrated optics: review // *J. Opt. Soc. Am. B.*, 2005. - 22 (1). - P. 240-253.
- Zvezdin A.K., Kotov V.A., *Modern Magneto-Optics and Magneto-Optical Materials*. IOP publishing, Philadelphia, 1997.
- Ebbesen T.W., Lezec H.J., Ghaemi H.F., Thio T., Wolff P.A. Extraordinary optical transmission through subwavelength hole arrays // *Nature*, 1998. - 391. - P. 667.
- Raether H., *Surface Plasmons on Smooth and Rough Surfaces and on Gratings*. Springer-Verlag, New York, 1988.
- Lomakin V., Michielssen E. Enhanced transmission through metallic plates perforated by arrays of subwavelength holes and sandwiched between dielectric slabs // *Phys. Rev. B*, 2005. - 71. - P. 235117.
- Lezec H., Thio T. Diffracted evanescent wave model for enhanced and suppressed optical transmission through subwavelength hole arrays // *Optics Express*, 2004. - 12 (16). - P. 3629-3651.
- Inoue M., Arai K., Fujii T., Abe M. One-dimensional magnetophotonic crystals // *J. Appl. Phys.*, 1999. - 85. - P. 5768-5770.
- Кочергин В.Е., Топоров А.Ю., Валеико М.В. Поляритонное усиление магнитооптического эффекта Фарадея // *Письма в ЖЭТФ*, 1998. - 68(5). - С.376-380.
- Sepulveda B., Lechuga L.M., Armelles G. Magneto-optic Effects in Surface-Plasmon-Polaritons Slab Waveguides // *J. Lightwave Techn.*, 2006. - 24 (2). - P. 945.
- Strel'niker Y.M., Bergman D.J. Optical transmission through metal films with a subwavelength hole array in the presence of a magnetic field // *Phys. Rev. B*, 1999. - 59. - P. R12763 - R12766.
- Diwekar M., Kamaev V., Shi J., Vardeny Z.V. Optical and magneto-optical studies of two-dimensional metallodielectric photonic crystals on cobalt films // *Appl. Phys. Lett.*, 2004. - 84. - P. 3112.
- Belotelov V.I., Doskolovich L.L., Kotov V.A., Zvezdin A.K. Magneto-optical properties of perforated metallic films // *JMMM*, 2007. - 310 (2). - P. e843-e845.
- Belotelov V.I., Doskolovich L.L., Zvezdin A.K. Extraordinary Magneto-Optical Effects and Transmission through Metal-Dielectric Plasmonic Systems // *Phys. Rev. Lett.*, 2007. - 98. - P. 17401.
- Belotelov V.I., Doskolovich L.L., Kotov V.A., Bezus E.A., Bykov D.A., Zvezdin A.K. Magneto-optical effects in the metal-dielectric gratings // *Optics Communications*, 2007. - 278. - P. 104-109.
- Tomita S., Kato T., Tsunashima S., Iwata S. Magneto-Optical Kerr Effects of Yttrium-Iron Garnet Thin Films Incorporating Gold Nanoparticles // *Phys. Rev. Lett.*, 2006. - 96. - P. 167402.
- Lord Rayleigh On the Dynamical Theory of Gratings // *Proceedings of the Royal Society of London*, 1907. - 79 (532). - P. 399-416.
- Wood R.W. Anomalous Diffraction Gratings // *Phys. Rev.*, 1935. - 48. - P. 928-936.
- Fano V.U. *Ann. Phys.*, 1938. 32. P. 393.
- Hessel A., Oliner A.A. A new theory of Wood's anomalies on optical gratings // *Appl. Opt.*, 1965. - 4. - P. 1275-1297.
- Bjork R.H., Karakashian A.S., Teng Y.Y. Behavior of surface-plasma oscillations on grating surfaces // *Phys. Rev. B*, 1974. - 9. - P. 1394-1401.
- Neviere M., Maystre D., Vincent P. Determination of the leaky modes of a corrugated waveguide: application to the study of anomalies of dielectric coated gratings // *J. Opt.*, 1977. 8. P. 231-242.
- Popov E., Tsonev L., Maystre D. Lamellar metallic gratings anomalies // *Appl. Opt.*, 1994. - 33. - P. 5214.
- Wendler L., Kraft T., Hartung M., Berger A., Wixforth A., Sundaram M., English J.H., Gossard A.C. Optical response of grating-coupler-induced intersubband resonances: The role of Wood's anomalies // *Phys. Rev. B*, 1997. - 55. - P. 2303-2314.
- Moharam M.G., Pommert D.A., Grann E.B., Gaylord T.K. Stable implementation of the rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings: enhanced transmittance matrix approach // *J. Opt. Soc. Am. A*, 1995. - 12. - P. 1077.
- Li L. Fourier modal method for crossed anisotropic gratings with arbitrary permittivity and permeability tensors // *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2003. - 5. - P. 345-355.
- Palik D., *Handbook of optical constants of solids*. Edward Academic press, Inc., Orlando, Florida, 1985.
- Steele J.M., Moran C.E., Lee A., Aguirre C.M., Halas N.J. Metallodielectric gratings with subwavelength slots: Optical properties // *Phys. Rev. B*, 2003. - 68. - P. 205103.
- Sarrazin M., Vigneron J-P., Vigoureux J-M. Role of Wood anomalies in optical properties of thin metallic films with a bidimensional array of subwavelength holes // *Phys. Rev. B*, 2003. - 67. - P. 085415.

# MAGNETO-OPTICAL EFFECTS IN DIFFRACTION GRATINGS ASSOCIATED WITH THE RAYLEIGH-WOOD ANOMALIES AND PLASMON EXCITATION

V.I. Belotelov<sup>1,2</sup>, E.A. Bezus<sup>3,4</sup>, D.A. Bykov<sup>3,4</sup>, L.L. Doskolovich<sup>3,4</sup>, V.A. Kotov<sup>4</sup>, A.K. Zvezdin<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Moscow State University (MSU), Moscow, Russia,

<sup>2</sup>General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences (GPI RAS), Moscow, Russia,

<sup>3</sup>Image Processing Systems Institute of the RAS, Samara, Russia,

<sup>4</sup>Samara State Aerospace University (SSAU), Samara, Russia

## Abstract

Resonant magneto-optical properties of subwavelength diffraction gratings with a uniformly magnetized dielectric substrate layer are studied. Special attention is given to the Rayleigh-Wood anomalies. It is found that at excitation frequencies of a surface plasmon the Faraday angle resonance is observed. Opportunities of the influence on magneto-optical effects is shown using nanostructures.

**Keywords:** Magneto-optics, diffraction grating, resonance

**Citation:** Belotelov VI, Bezus EA, Bykov DA, Doskolovich LL, Kotov VA, Zvezdin AK. Magneto-optical effects in diffraction gratings associated with the Rayleigh-Wood anomalies and plasmon excitation [In Russian]. *Computer Optics* 2007; 31(3): 4-8.

**Acknowledgements:** The research has been performed with financial support from the Russian Foundation for Basic Research grants Nos. 06-02-17507, 07-02-91588, 07-02-01445, 07-01-96602, 07-07-97601, 07-07-91580, the Russian-American Basic Research and Higher Education Program (grant CRDF RUX0-014-SA-06) and the Dynasty Foundation.

## References:

- [1] Dötsch H, Bahlmann N, Zhuromskyy O et. al. Applications of magneto-optical waveguides in integrated optics: review. *J. Opt. Soc. Am. B* 2005; 22(1): 240-253.
- [2] Zvezdin AK, Kotov VA. *Modern Magneto-Optics and Magneto-Optical Materials*. IOP publishing, Philadelphia, 1997.
- [3] Ebbesen TW, Lezec HJ, Ghaemi HF, Thio T, Wolff PA. Extraordinary optical transmission through subwavelength hole arrays. *Nature* 1998; 391: 667.
- [4] Raether H. *Surface Plasmons on Smooth and Rough Surfaces and on Gratings*. Springer-Verlag, New York, 1988.
- [5] Lomakin V, Michielssen E. Enhanced transmission through metallic plates perforated by arrays of subwavelength holes and sandwiched between dielectric slabs. *Phys. Rev. B* 2005; 71: 235117.
- [6] Lezec H, Thio T. Diffracted evanescent wave model for enhanced and suppressed optical transmission through subwavelength hole arrays. *Optics Express* 2004; 12(16): 3629-3651.
- [7] Inoue M, Arai K, Fujii T, Abe M. One-dimensional magnetophotonic crystals. *J. Appl. Phys* 1999; 85: 5768-5770.
- [8] Kochergin VE, Toporov AYu, Valeiko MV. Polariton enhancement of the Faraday magneto-optic effect [In Russian]. *JETP Letters* 1998; 68(5): 376-380.
- [9] Sepulveda B, Lechuga LM, Armelles G. Magneto-optic Effects in Surface-Plasmon-Polaritons Slab Waveguides. *J. Light-wave Techn.* 2006; 24(2): 945.
- [10] Strelniker YM, Bergman DJ. Optical transmission through metal films with a subwavelength hole array in the presence of a magnetic field. *Phys. Rev. B* 1999; 59: R12763-R12766.
- [11] Diwekar M, Kamaev V, Shi J, Vardeny ZV. Optical and magneto-optical studies of two-dimensional metallodielectric photonic crystals on cobalt films. *Appl. Phys. Lett.* 2004; 84: 3112.
- [12] Belotelov VI, Doskolovich LL, Kotov VA, Zvezdin AK. Magneto-optical properties of perforated metallic films. *JMMM* 2007; 310(2): e843-e845.
- [13] Belotelov VI, Doskolovich LL, Zvezdin AK. Extraordinary Magneto-Optical Effects and Transmission through Metal-Dielectric Plasmonic Systems. *Phys. Rev. Lett.* 2007; 98: 77401.
- [14] Belotelov VI, Doskolovich LL, Kotov VA, Bezus EA, Bykov DA, Zvezdin AK. Magneto-optical effects in the metal-dielectric gratings. *Optics Communications* 2007; 278: 104-109.
- [15] Tomita S, Kato T, Tsunashima S, Iwata S. Magneto-Optical Kerr Effects of Yttrium-Iron Garnet Thin Films Incorporating Gold Nanoparticles. *Phys. Rev. Lett.* 2006; 96: 167402.
- [16] Lord Rayleigh On the Dynamical Theory of Gratings. *Proceedings of the Royal Society of London* 1907; 79(532): 399-416.
- [17] Wood RW. Anomalous Diffraction Gratings. *Phys. Rev.* 1935; 48: 928-936.
- [18] Fano VU. *Ann. Phys.* 1938; 32: 393.
- [19] Hessel A, Oliner AA. A new theory of Wood's anomalies on optical gratings. *Appl. Opt.* 1965; 4: 1275-1297.
- [20] Bjork RH, Karakashian AS, Teng YY. Behavior of surface-plasma oscillations on grating surfaces. *Phys. Rev. B* 1974; 9: 1394-1401.
- [21] Neviere M, Maystre D, Vincent P. Determination of the leaky modes of a corrugated waveguide: application to the study of anomalies of dielectric coated gratings. *J. Opt.* 1977; 8: 231-242.
- [22] Popov E, Tsonev L, Maystre D. Lamellar metallic gratings anomalies. *Appl. Opt.* 1994; 33: 5214.
- [23] Wendler L, Kraft T, Hartung M, Berger A, Wixforth A, Sundaram M, English JH, Gossard AC. Optical response of grating-coupler-induced intersubband resonances: The role of Wood's anomalies. *Phys. Rev. B* 1997; 55: 2303-2314.
- [24] Moharam MG, Pommet DA, Grann EB, Gaylord TK. Stable implementation of the rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings: enhanced transmittance matrix approach. *J. Opt. Soc. Am. A* 1995; 12: 1077.

- [25] Li L. Fourier modal method for crossed anisotropic gratings with arbitrary permittivity and permeability tensors. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 2003; 5: 345-355.
- [26] Palik D. Handbook of optical constants of solids. Edward Academic press, Inc. Orlando, Florida, 1985.
- [27] Steele JM, Moran CE, Lee A, Aguirre CM, Halas NJ. Metallodielectric gratings with subwavelength slots: Optical properties. *Phys. Rev. B* 2003; 68: 205103.
- [28] Sarrazin M, Vigneron J-P, Vigoureux J-M. Role of Wood anomalies in optical properties of thin metallic films with a bidimensional array of subwavelength holes. *Phys. Rev. B* 2003; 67: 085415.