

УДК 537.632.3:535-92

ВЛИЯНИЕ ФАКТОРА ЗАПОЛНЕНИЯ НА КОЭФФИЦИЕНТ ОТРАЖЕНИЯ И ЭКВАТОРИАЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ КЕРРА ДВУМЕРНЫХ МАГНИТОПЛАЗМОННЫХ КРИСТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ ПЕРМАЛЛОЯ

© 2024 г. Д. В. Мурзин¹ *, В. К. Беляев¹, К. А. Гриценко¹, В. В. Родионова¹

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования “Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта”, Калининград, Россия

*E-mail: dvmurzin@yandex.ru

Поступила в редакцию 15.11.2023

После доработки 22.11.2023

Принята к публикации 28.12.2023

Изучен коэффициент отражения и экваториальный эффект Керра для серии двумерных магнитоплазмонных кристаллов на основе серебра, пермаллоя $Ni_{80}Fe_{20}$ и нитрида кремния Si_3N_4 . Показано, что фактор заполнения образцов нелинейно влияет на их оптические и магнитооптические свойства. Максимальная величина эффекта Керра составляет 0.88% при факторе заполнения равном 0.77.

DOI: 10.31857/S0367676524040241, EDN: QGGHAT

ВВЕДЕНИЕ

Для правильной работы различных электрических и механических систем в автомобильной, коммуникационной, биомедицинской, промышленной и других сферах необходимо контролировать напряженность и распределение магнитного поля, генерируемого отдельными элементами системы [1]. В то время как большинство существующих методов основано на регистрации электрического сигнала, генерируемого чувствительным элементом вследствие приложения магнитного поля, оптические датчики способны обнаруживать магнитное поле за счет изменения состояния света, взаимодействующего с чувствительным элементом. Наиболее перспективные оптические методы регистрации магнитного поля, такие как магнитометры с оптической накачкой и устройства на базе азотных вакансий в алмазах, основаны на квантовых эффектах [2, 3]. Однако оба метода требуют больших затрат на настройку и изготовление чувствительных элементов. Более дешевыми оптическими датчиками магнитного поля, подходящими для применения в сферах с менее строгими требованиями к чувствительности и стабильности чувствительных элементов, являются магнитооптические датчики. Чувствительные элементы магнитооптических датчиков могут быть изготовлены из широкого спектра ферромагнитных металлов, магнитных диэлектриков, полупроводников и редкоземельных материалов [4]. Для усиления магнитооптических эффектов чувствительные элементы

могут быть изготовлены из наноструктурированных материалов, поддерживающих возбуждение различных электромагнитных мод [5]. Возбуждение таких мод проявляется в виде резонансов в спектрах пропускания или поглощения света и приводит к усилению магнитооптических эффектов в узком спектральном диапазоне. Магнитооптические чувствительные элементы могут быть изготовлены из фотонных кристаллов, в состав которых также входят магнитные материалы, — магнитофотонных кристаллов [6]. Чувствительность и рабочий спектральный диапазон магнитофотонных кристаллов зависят от состава и числа слоев структуры, однако их недостатком является возможность работы только в геометрии пропускания света, а также сложность изготовления высококачественных двумерных и трехмерных фотонных кристаллов. Другой способ усиления магнитооптических эффектов заключается в использовании магнитоплазмонных кристаллов в виде дифракционных решеток, изготовленных из комбинированных магнитных и плазмонных материалов [7, 8]. Измерения магнитного поля с помощью магнитоплазмонных кристаллов основаны на детектировании магнитооптических эффектов, резонансно усиленных за счет возбуждения поверхностных плазмон-поляритонов — диффузных продольных электромагнитных волн, распространяющихся на границе раздела металл/диэлектрик [9]. Изменение состава и морфологии магнитоплазмонных кристаллов используется для настройки чувствительности, диапазона измерения и рабочего спектрального

диапазона чувствительных элементов. Например, магнитоплазменные кристаллы, изготовленные из слоев железо–иттриевого граната и золота, могут быть использованы в качестве чувствительных элементов, работа которых основана на меридиональном магнитофотонном интенсивностном эффекте [10]. Такие элементы позволяют измерять компоненты напряженности внешнего магнитного поля, лежащие в плоскости чувствительного элемента. В качестве альтернативы датчики магнитного поля могут работать на основе экваториального эффекта Керра (δ), усиленного за счет возбуждения поверхностных плазмон-поляритонов в одномерных магнитоплазменных кристаллах [11]. Чувствительность и диапазон измерения такого метода зависят от динамики перемагничивания и оптических свойств магнитоплазменных кристаллов, которые определяются их составом и морфологией [12].

В то время как продемонстрированные чувствительные элементы на основе одномерных магнитоплазменных кристаллов позволяют определить только одну компоненту магнитного поля в плоскости чувствительного элемента, переход к магнитоплазменным кристаллам на основе двумерных дифракционных решеток позволит детектировать две компоненты магнитного поля в плоскости образца за счет возбуждения поверхностных плазмон-поляритонов вдоль двух перпендикулярных направлений. Данная работа посвящена изготовлению и изучению оптических и магнитооптических свойств серии двумерных магнитоплазменных кристаллов на основе тонких пленок серебра, поликристаллического пермаллоя $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ и нитрида кремния Si_3N_4 . Магнитоплазменные кристаллы были изготовлены методом электронно-лучевой литографии с разной дозой электронного пучка, что позволило получить образцы с фиксированным периодом и высотой профиля. В работе показано как доза пучка влияет на коэффициент отражения (R) и δ образцов, определяющие возможность использования двумерных магнитоплазменных кристаллов в качестве сенсорных элементов датчиков магнитного поля.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Магнитоплазменные кристаллы были изготовлены в несколько этапов. Сначала стеклоуглеродная пластина Sigradur G размером $0.8 \times 1 \times 0.15 \text{ см}^3$ (HTW Hochtemperatur-Werkstoffe GmbH, Германия) была покрыта слоем электронрезиста из смеси полиметилметакрилата марки РММА 950 А 4 фирмы Microchem и анизола в пропорции 1:2. Электронрезист наносили на предварительно химически очищенную подложку, которую затем центрифугировали при 5000 об/мин в течение 50 с. Подложку предварительно очищали в УЗ ванне с толуолом в течение 15 мин, затем в УЗ ванне с ацетоном

в течение 15 мин и на финальном этапе – со спиртом на 10 мин, после чего продували подложку потоком азота. После центрифугирования подложку со слоем электронрезиста запекали при температуре 180° в течение 30 с. Толщина слоя электронрезиста на поверхности подложки составила 90 нм. Затем с помощью программного обеспечения TESCAN DrawBeam Advanced был подготовлен шаблон для литографии, состоящий из девяти областей с двумерными дифракционными решетками с квадратным профилем размером $500 \times 500 \text{ мкм}^2$. Период дифракционных решеток в каждой области составил 610 нм. Шаблон для литографии на поверхности подложки формировали с использованием сканирующего электронного микроскопа TESCAN VEGA 3 путем экспонирования электронным пучком с током 14 нА и дозами в диапазоне от 200 до 600 мкКл/см^2 с шагом 50 мкКл/см^2 . После выполнения литографии образцы проявляли в растворе 4-метил-2-пентанона и изопропилового спирта в соотношении частей 1:3 в течение 60 с. В том же технологическом процессе была подготовлена подложка для контрольного образца. На следующем этапе подготовленные подложки покрывали слоем серебра толщиной 100 нм, слоем поликристаллического пермаллоя $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ толщиной 70 нм и нитридом кремния Si_3N_4 толщиной 15 нм с помощью установки магнетронного распыления ORION компании AJA International. Базовое давление камеры магнетрона составляло $2.4 \cdot 10^{-8}$ Торр. Во время напыления давление в камере поддерживали на уровне $5 \cdot 10^{-3}$ Торр при потоке аргона $10 \text{ см}^3/\text{мин}$ и мощности ДС источника, равной 75 Вт. Во время напыления держатель подложки вращался со скоростью 50 об/мин. В том же цикле напыления был подготовлен контрольный образец на основе гладкой стеклоуглеродной подложки.

Поверхность изготовленных магнитоплазменных кристаллов была изучена при помощи сканирующего электронного микроскопа TESCAN VEGA 3 в режиме регистрации вторичных электронов с ускоряющим напряжением 30 кВ. Полученные изображения были использованы для расчета фактора заполнения K магнитоплазменных кристаллов по формуле:

$$K = \frac{S}{d^2}, \quad (1)$$

где S – площадь отдельно взятой колонны двумерной решетки, а d – период решетки. Расчет проводили путем усреднения по 10 значениям, полученным для разных колонок на поверхности магнитоплазменных кристаллов.

Спектральные зависимости R и δ измеряли в p -поляризованном свете в спектральном диапазоне 550–800 нм при угле падения света, равном 65° . Это значение было выбрано для соблюдения

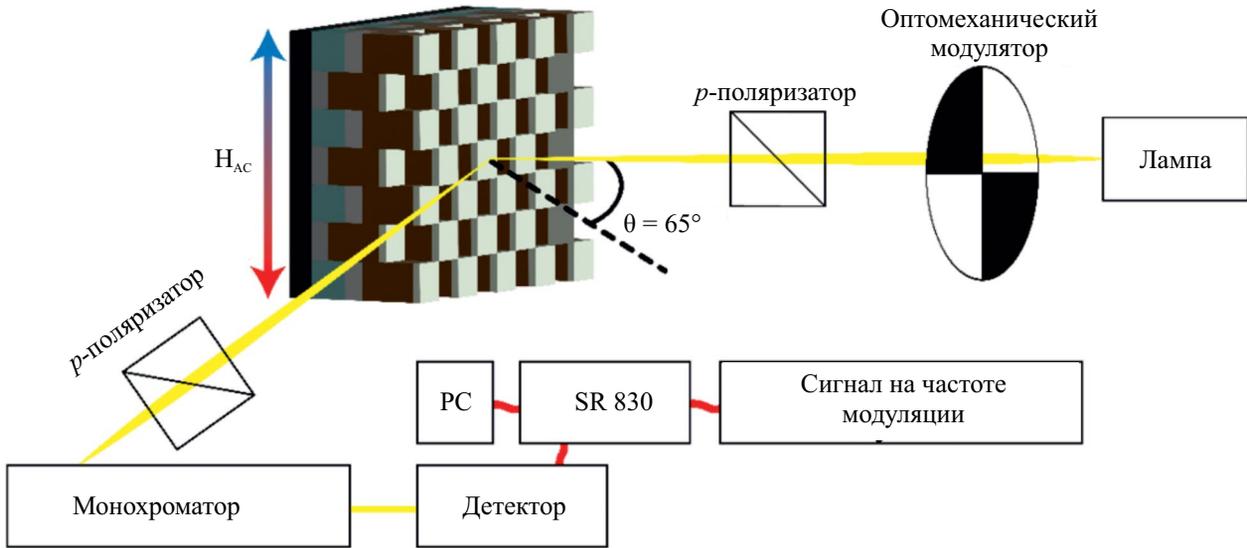


Рис. 1. Схематическое изображение установки, использованной для получения спектральных зависимостей R и δ . H_{AC} – модулирующее магнитное поле.

условий возбуждения поверхностных плазмон–поляритонов, связанных с перераспределением энергии –2 порядка дифракции. Данные условия выражаются уравнением:

$$\left| \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{\epsilon_m \epsilon}{\epsilon_m + 1}} \right|^2 = (k_0 \sin \theta \cos \varphi + mG_x)^2 + (k_0 \sin \theta \sin \varphi + nG_y)^2, \quad (2)$$

где λ – длина волны, ϵ_m и ϵ – диэлектрические проницаемости металлического и диэлектрического слоев, k_0 – волновой вектор падающего света, θ – угол падения света, φ – азимутальный угол, m и n – целые числа, обозначающие порядки дифракции и соответствующие моды поверхностных–плазмон–поляритонов, $G_x = 2\pi/d_x$ и $G_y = 2\pi/d_y$ – векторы дифракционной решетки. Измерительная установка состояла из галогенной лампы, двух пленочных поляризаторов LPNIRE100-B фирмы Thorlabs, пары электромагнитов, оптомеханического модулятора OCV-6300 фирмы Avesta, монохроматора MS-6400i фирмы Sol Instruments, лавинного фотодиода APD130A2/M фирмы Thorlabs и синхронного усилителя SR830 фирмы Stanford Research Systems. При измерении спектральной зависимости R оптическое излучение модулировали с использованием оптомеханической модуляции на частоте 244 Гц. Схематическое изображение установки показано на рис. 1. Спектральная зависимость δ была рассчитана в насыщающем переменном магнитном поле с частотой 68 Гц по формуле:

$$\delta = \frac{R_{+H} - R_{-H}}{R} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где R_{+H} и R_{-H} – коэффициенты отражения в зависимости от направления внешнего магнитного поля. Величина модуляции эффекта $\Delta\delta$ была рассчитана как разница между значениями δ в узком спектральном диапазоне, соответствующем резонансному усилению δ .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 продемонстрированы изображения поверхности магнитоплазмонных кристаллов, изготовленных при разных дозах электронного пучка. Согласно полученным изображениям, период магнитоплазмонных кристаллов в вертикальном и горизонтальном направлениях соответствует заявленному и составляет 610 ± 6 нм. Увеличение дозы электронного пучка приводит к уменьшению K с 0.93 при дозе пучка 200 мкКл/см^2 до 0.54 при дозе пучка 600 мкКл/см^2 . Экспериментальная зависимость K от дозы электронного пучка имеет нелинейный характер и может быть аппроксимирована экспоненциальной функцией со значением суммы квадратов остатков регрессии равным 0.00128 и величиной коэффициента детерминации, равным единице. Гауссово распределение энергии электронного пучка также обусловило увеличение скругления вершин отдельных колонн при увеличении дозы электронного пучка.

Согласно работе [13] в двумерных магнитоплазмонных кристаллах за счет эффектов дифракции p -поляризованный свет может быть использован для возбуждения коллинеарных и неколлинеарных плазмон–поляритонов, которые проявляются в виде локальных минимумов интенсивности отраженного света в спектральных зависимостях R .

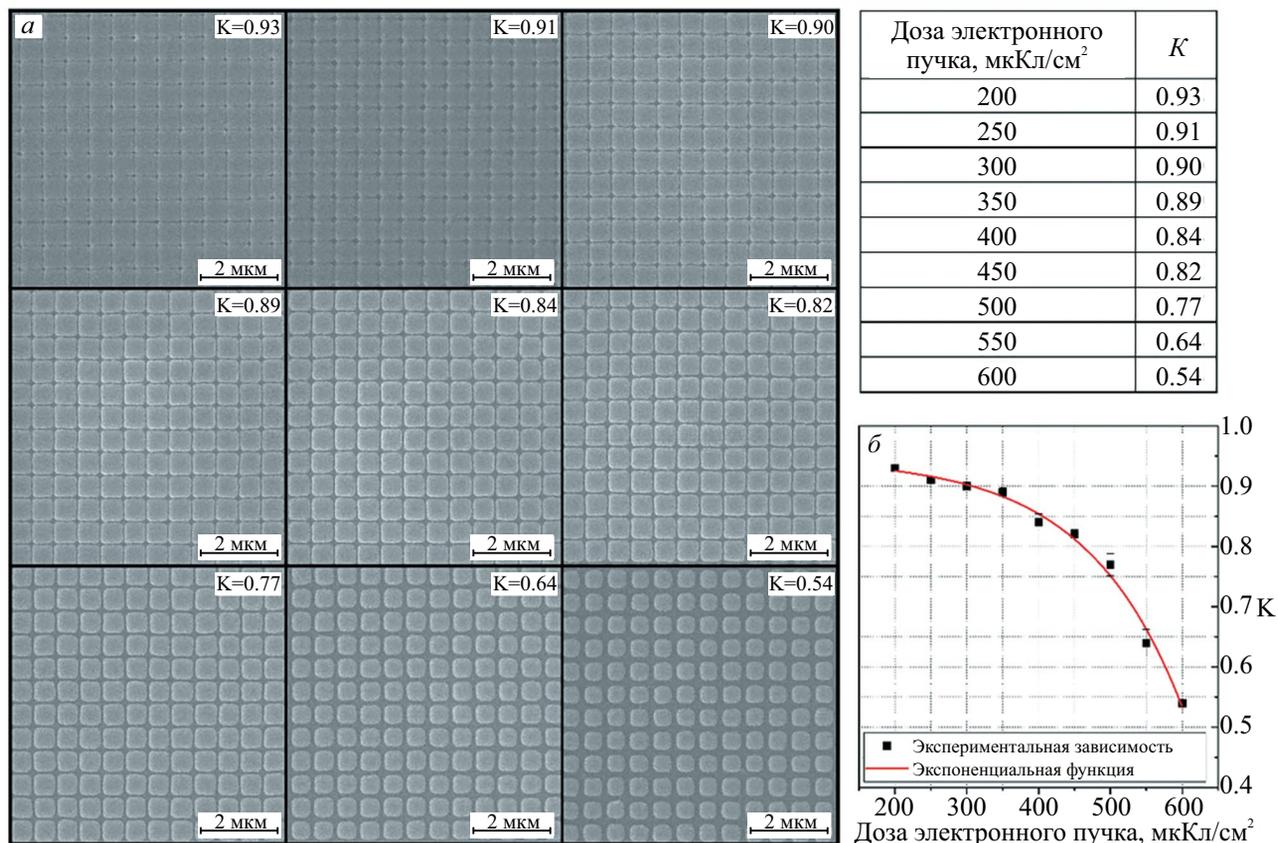


Рис. 2. Изображения поверхности магнитоплазменных кристаллов с различным фактором заполнения K (а). В таблице приведены значения K и соответствующие дозы электронного пучка. Панель (б) демонстрирует экспериментальную зависимость K от дозы электронного пучка (черные точки), а также аппроксимацию полученных данных экспоненциальной функцией (красная сплошная линия).

Данные минимумы называются аномалиями Релея–Вуда, а их положение соответствует условиям фазового синхронизма, рассчитанным по формуле (2). В спектральных зависимостях R полученных для магнитоплазменных кристаллов и показанных на рис. 3а–з спектральное положение аномалий Релея–Вуда соответствует $\lambda \approx 605$ нм и не претерпевает значительных изменений для разных образцов ввиду сохранения периода при уменьшении K . В отличие от образцов магнитоплазменных кристаллов, в спектральной зависимости R для контрольного образца, показанной на рис. 3и, аномалия Релея–Вуда отсутствует. Кроме ярко выраженных аномалий Релея–Вуда для образцов магнитоплазменных кристаллов с K в диапазоне 0.91–0.82 вблизи $\lambda \approx 820$ нм наблюдается минимум R . Согласно расчетам условий фазового синхронизма по формуле (2), результаты которого показаны на рис. 3л, длины волн возбуждения коллинеарных и неколлинеарных плазмон-поляритонов при угле падения света 65° составляют 599 и 637 нм, что служит причиной уширения аномалий Релея–Вуда,

но не может привести к появлению особенности в окрестности $\lambda \approx 820$ нм. Данные резонансы также не связаны с коллективным плазмонным резонансом в системе колонн магнитоплазменных кристаллов, так как для этого их спектральная ширина должна быть в несколько раз меньше [14]. Предположительно, данная особенность, проявляющаяся только для образцов с K в диапазоне 0.91–0.82, связана с возбуждением локализованных плазмонных резонансов на неоднородностях отдельных колонн, размеры которых значительно меньше длины волны падающего света. Дальнейшее уменьшение K и соответствующее увеличение расстояния между колоннами, а также сглаживание вершин и ребер колонн, приводит к исчезновению данного резонанса в спектральных зависимостях R .

Возбуждение плазмонных мод на поверхности магнитоплазменных кристаллов приводит к появлению резонансных особенностей в спектрах δ , проявляющихся в тех же диапазонах длин волн, что и особенности в спектрах R . В спектральном диапазоне, соответствующем возбуждению аномалий

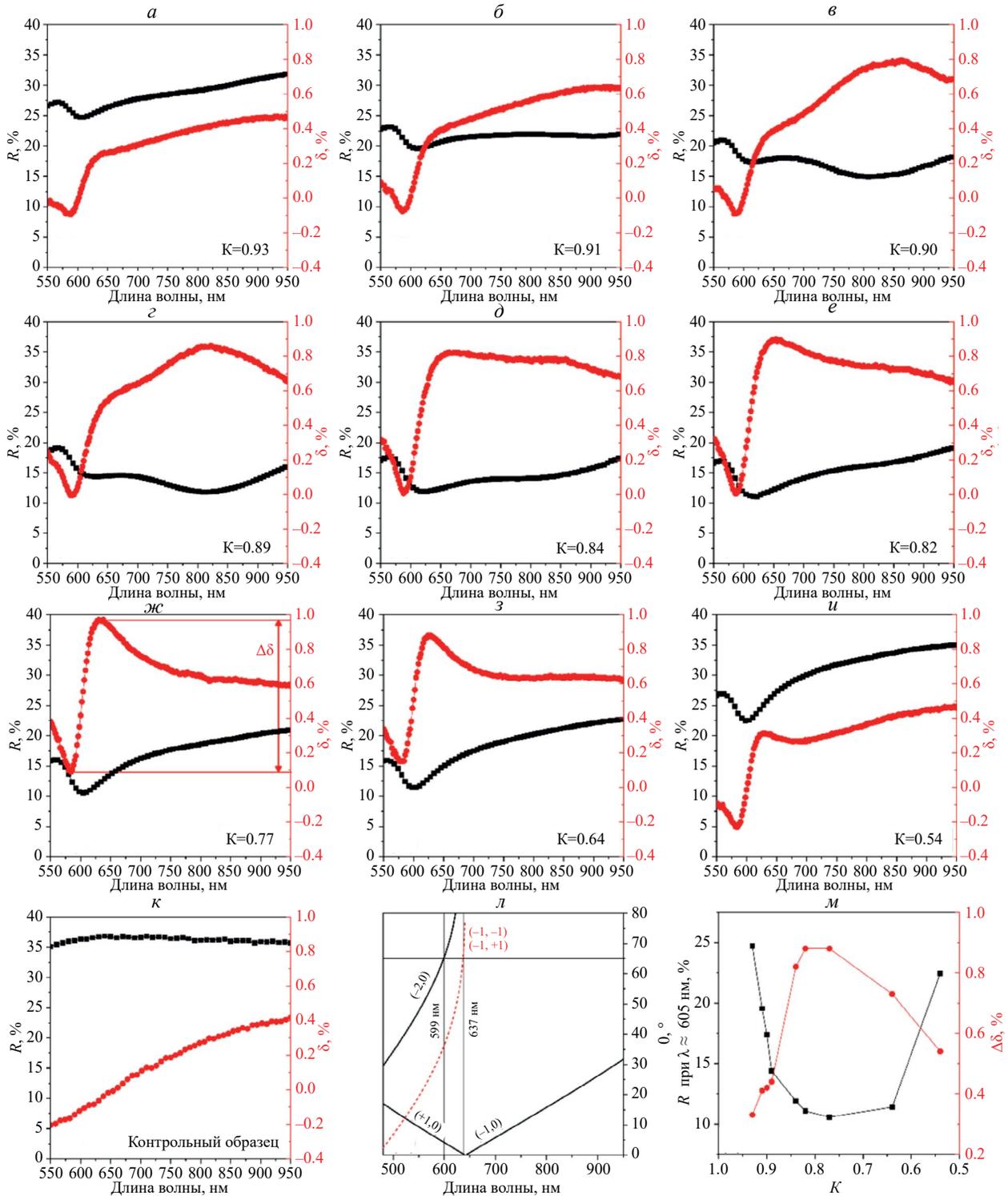


Рис. 3. Спектральные зависимости R (черные линии с квадратными точками) и δ (красные линии с круглыми точками), измеренные для образцов магнитоплазменных кристаллов с различным K и контрольного образца (а–к). Расчетное спектральное положение аномалий Релея–Вуда в координатах длина волны – угол падения в случае p -поляризованного света и нулевого азимутального угла (л). Черные сплошные линии соответствуют случаю возбуждения коллинеарных плазменных мод, а красная пунктирная линия соответствует случаю возбуждению неколлинеарных плазменных мод. Значения в скобках (m_x, m_y) соответствуют порядкам дифракции вдоль перпендикулярных направлений решетке. Зависимость R (черная линия с квадратными точками) и $\Delta\delta$ (красная линия с круглыми точками) вблизи резонансной длины волны $\lambda \approx 605$ нм от величины K (м).

Релея—Вуда, величина δ претерпевает усиление благодаря возбуждению коллинеарных и неколлинеарных поверхностных плазмон-поляритонов. Согласно полученным результатам $\Delta\delta$ в данном диапазоне нелинейно зависит от K , достигая максимального значения 0.88% в окрестности $K \approx 0.77$, что соответствует усилению в 4 раза, по сравнению с контрольным образцом в том же спектральном диапазоне. При дальнейшем уменьшении K значение $\Delta\delta$ убывает, сопровождаясь увеличением R на длине волны резонанса. Полученные зависимости $\Delta\delta$ и R от величины K показаны на рис. 3м. Кроме того, в спектрах δ для магнитоплазмонных кристаллов в диапазоне $K = 0.91$ – 0.82 по аналогии со спектральными зависимостями R наблюдается усиление эффекта в диапазоне $\lambda \approx 700$ – 950 нм. Несмотря на увеличение δ , которое необходимо для реализации датчика магнитного поля на основе изготовленных образцов, данная особенность приводит к размытию резонанса в окрестности $\lambda = 605$ нм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нами были продемонстрированы результаты исследования коэффициента отражения и экваториального эффекта Керра для серии магнитоплазмонных кристаллов, основанных на двумерных дифракционных решетках, покрытых слоями серебра толщиной 100 нм, пермаллоя $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ толщиной 70 нм и нитрида кремния Si_3N_4 толщиной 15 нм. Варьирование дозы электронного пучка, использованного при изготовлении образцов, показало экспоненциальную зависимость величины фактора заполнения дифракционных решеток в диапазоне 0.93–0.54 при изменении дозы экспонирования с 200 до 600 мкКл/см². Возбуждение плазмонных мод на поверхности магнитоплазмонных кристаллов приводило к возникновению аномалий Релея—Вуда в видимой области с минимумом коэффициента отражения, достигающим 10.6% для образца с фактором заполнения 0.77.

Для данного образца магнитоплазмонного кристалла также наблюдалось максимальное значение модуляции экваториального эффекта Керра равное 0.88%.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-22-00997).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ripka P. Magnetic sensors and magnetometers. Artech House, 2021. 416 p.
2. Tierney T.M., Holmes N., Mellor S. et al. // NeuroImage. 2019. V. 199. P. 598.
3. Rondin L., Tétienne J.-P., Hingant T. et al. // Rep. Prog. Phys. 2014. V. 77. No. 5. Art. No. 056503.
4. Gutiérrez Y., Brown A.S., Moreno F. et al. // J. Appl. Phys. 2020. V. 128. No. 8. Art. No. 080901.
5. Wu Y., Xie P., Ding Q. et al. // J. Appl. Phys. 2023. V. 133. No. 3. Art. No. 030902.
6. Romodina M.N., Soboleva I.V., Musorin A.I. et al. // Phys. Rev. B. 2017. V. 96. No. 8. Art. No. 081401.
7. Belotelov V.I., Akimov I.A., Pohl M. et al. // Nature Nanotechnol. 2011. V. 6. No. 6. P. 370.
8. Kiryanov M.A., Frolov A.Y., Novikov I.A. et al. // APL Photonics. 2022. V. 7. No. 2. Art. No. 026104.
9. Ávalos L., González-Alcalde A.K., Chaikina E.I. et al. // Opt. Commun. 2021. V. 500. Art. No. 127324.
10. Knyazev G.A., Kapralov P.O., Gusev N.A. et al. // ACS Photonics. 2018. V. 5. No. 12. P. 4951.
11. Belyaev V.K., Rodionova V.V., Grunin A.A. et al. // Sci. Reports. 2020. V. 10. No. 1. Art. No. 7133.
12. Murzin D., Belyaev V.K., Groß F. et al. // J. Magn. Mater. 2023. V. 588. Art. No. 171398.
13. Maccaferri N., Inchausti X., García-Martín A. et al. // ACS Photonics. 2015. V. 2. No. 12. P. 1769.
14. Kravets V.G., Kabashin A.V., Barnes W.L. et al. // Chem. Rev. 2018. V. 188. No. 12. P. 5912.

Influence of filling factor on reflectivity and transversal Kerr effect of permalloy-based two-dimensional magnetoplasmonic crystals

D. V. Murzin^{1, *}, V. K. Belyaev¹, Ch. Gritsenko¹, V. V. Rodionova¹

¹Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, 236041 Russia

*e-mail: dvmurzin@yandex.ru

We studied the coefficient of reflection and transversal Kerr effect for a series of two-dimensional magnetoplasmonic crystals based on silver, permalloy $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ and silicon nitride Si_3N_4 . It is shown that the filling factor of the samples has a nonlinear effect on their optical and magneto-optical properties. The maximum value of the Kerr effect is 0.88% with a filling factor of 0.77.