



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2015151438, 01.12.2015

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
01.12.2015Дата регистрации:
22.05.2017

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 01.12.2015

(45) Опубликовано: 22.05.2017 Бюл. № 15

Адрес для переписки:

119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1,
Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова, Фонд "Национальное
интеллектуальное развитие"

(72) Автор(ы):

Зубюк Варвара Владимировна (RU),
Четвертухин Артём Вячеславович (RU),
Мусорин Александр Игоревич (RU),
Шарипова Маргарита Ильгизовна (RU),
Долгова Татьяна Викторовна (RU),
Федянин Андрей Анатольевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

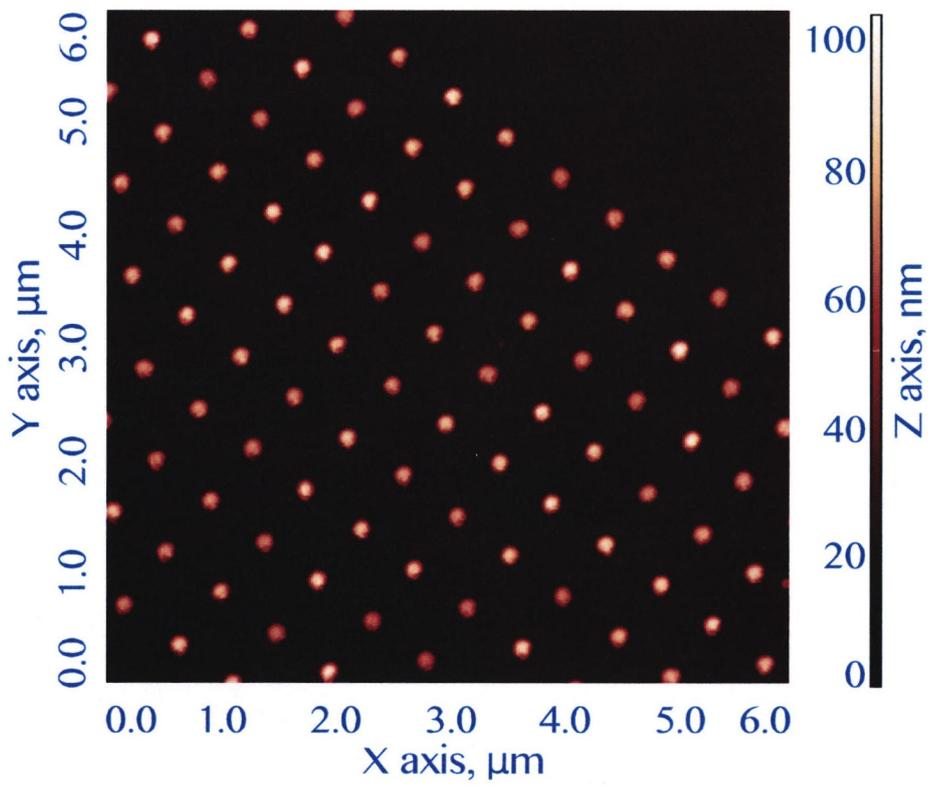
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Московский государственный
университет имени М.В. Ломоносова" (МГУ)
(RU)(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: US 9110316 B2, 18.08.2015. CN
101881918 A, 10.11.2010. WO 2004051361 A1,
17.06.2004. CN 102231034 A, 02.11.2011.

(54) СПОСОБ МОДУЛЯЦИИ ИНТЕНСИВНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МАГНИТОПЛАЗМОННОГО КРИСТАЛЛА

(57) Реферат:

Изобретение относится к оптике, а именно к способам модуляции интенсивности света оптического и ближнего ИК диапазонов. Изобретение может быть использовано в прикладной магнитооптике, в оптоэлектронике, фотонике, а также в сенсорной технике. Способ модуляции интенсивности прошедшего или отраженного электромагнитного излучения с помощью магнитоплазмонного кристалла включает в себя создание двумерного магнитоплазмонного кристалла, состоящего из прозрачной диэлектрической подложки, двумерного массива частиц из благородного

металла с субволновыми размерами, погруженного в тонкий диэлектрический магнитный слой толщиной не меньше размера частиц; освещение магнитоплазмонного кристалла ТМ-поляризованным электромагнитным излучением при приложении магнитного поля в геометрии экваториального магнитооптического эффекта Керра. Технический результат - модуляция интенсивности прошедшего и отраженного оптического излучения с помощью структуры с размерами меньше, чем длина волны используемого излучения. 4 з.п. ф-лы, 4 ил., 1 табл.



Фиг. 2



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**(21)(22) Application: **2015151438, 01.12.2015**(24) Effective date for property rights:
01.12.2015Registration date:
22.05.2017

Priority:

(22) Date of filing: **01.12.2015**(45) Date of publication: **22.05.2017** Bull. № 15

Mail address:

119991, Moskva, GSP-1, Leninskie gory, 1,
Moskovskij gosudarstvennyj universitet imeni M.V.
Lomonosova, Fond "Natsionalnoe intellektualnoe
razvitiie"

(72) Inventor(s):

**Zubyuk Varvara Vladimirovna (RU),
Chetvertukhin Artem Vyacheslavovich (RU),
Musorin Aleksandr Igorevich (RU),
Sharipova Margarita Ilgizovna (RU),
Dolgova Tatyana Viktorovna (RU),
Fedyanin Andrej Anatolevich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Federalnoe gosudarstvennoe byudzhethoe
obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego
obrazovaniya "Moskovskij gosudarstvennyj
universitet imeni M.V. Lomonosova" (MGU)
(RU)**

(54) **METHOD FOR MODULATION OF ELECTROMAGNETIC RADIATION INTENSITY USING MAGNETOPLASMONIC CRYSTAL**

(57) Abstract:

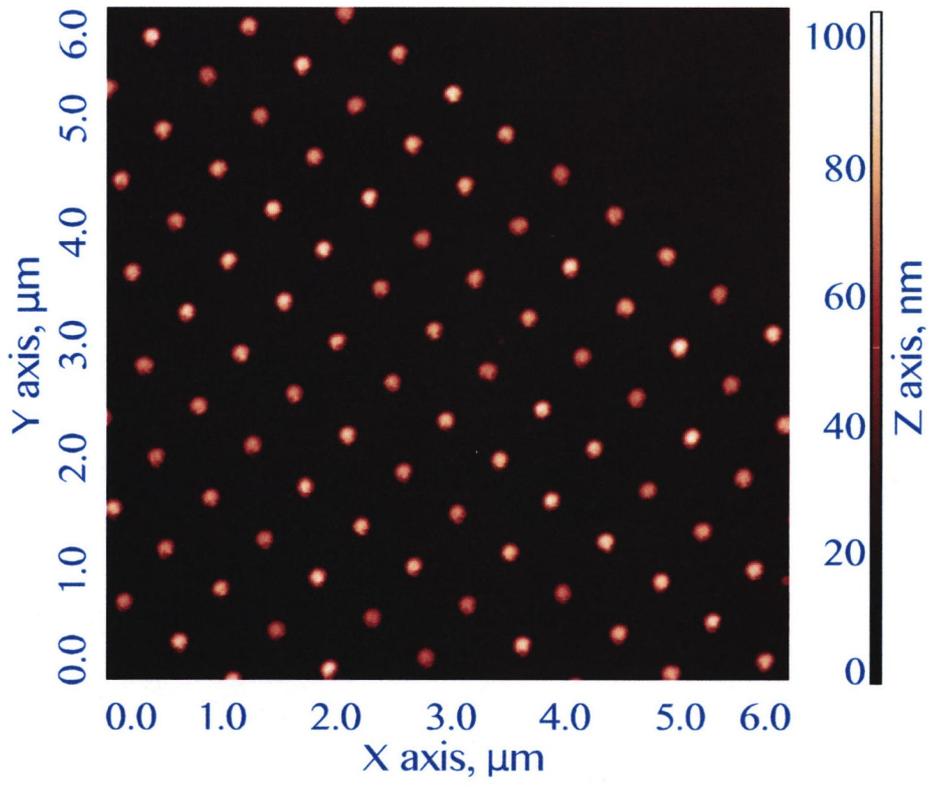
FIELD: physics, instrumentation.

SUBSTANCE: invention refers to optics, namely to a light intensity modulation method for optical and near infrared ranges. The invention can be used in the applied magneto-optics, optoelectronics, photonics, as well as sensor technology. The method for intensity modulation of transmitted or reflected electromagnetic radiation using a magnetoplasmonic crystal includes creation of a bidimensional magnetoplasmonic crystal consisting of a transparent dielectric substrate, a two-dimensional array of noble metal particles of subwave

size immersed into the thin magnetic dielectric layer with a thickness not smaller than the particle size; lighting of magnetoplasmonic crystal by TM-polarized electromagnetic radiation upon application of a magnetic field in the geometry of the equatorial magneto-optical Kerr effect.

EFFECT: invention provides intensity modulation of transmitted and reflected optical radiation via structures with dimensions smaller than the wavelength of the applied radiation.

5 cl, 4 dwg, 1 tbl



Фиг. 2

Область техники, к которой относится изобретение

Изобретение относится к оптике, а именно к способам модуляции интенсивности света оптического и ближнего ИК диапазонов. Изобретение может быть использовано в прикладной магнитооптике, в оптоэлектронике, фотонике, а также в сенсорной

5 технике.

Уровень техники

Магнитоплазмоника как ответвление магнитооптики получила свое развитие благодаря возможности усиления магнитооптических эффектов в периодически наноструктурированных магнитоплазмонных материалах вследствие резонансного возбуждения плазмонов (Belotelov, V.I., Akimov, I.A., Pohl, M., Kotov, V.A., Kasture, S., Vengurlekar, A.S., ... & Bayer, M. Enhanced magneto-optical effects in magnetoplasmonic crystals. Nature Nanotechnology, 6 (6), 370-376, (2011)).

10

Известны метод и устройство для модулирования фазы отраженного светового сигнала на основе эффекта Керра (US 4246549, МПК: H01S 3/10). Устройство реализует управляемый контроль фазы отраженного сигнала при отражении от слоя ферромагнитного или ферримагнитного граната, помещенного на поверхность с коэффициентом отражения предпочтительно свыше 95%, который может быть реализован, например, в виде набора диэлектрических слоев. В устройстве используется усовершенствование, связанное с использованием слоя из ферромагнитного или

15

20

ферримагнитного граната, в отличие от известных аналогичных устройств, использующих железный слой для эффекта Керра, который обладает высоким поглощением и склонностью к окислению.

Однако данное устройство обладает большой толщиной, включающей необходимую толщину магнитного граната, а также отражающий слой.

25

Известны также способ и устройство (US 5477376, МПК: G02F 1/09) для модулирования интенсивности прошедшего излучения на основе магнитооптического эффекта Фарадея методом изменения намагниченности магнитного гранатового слоя при помощи электромагнита либо механически смещаемого постоянного магнита. Устройство включает в себя структуру с чередующимися доменами намагниченности в направлении, перпендикулярном распространению модулируемого излучения. В

30

отсутствии магнитного поля домены с противоположным направлением намагниченности образуют дифракционную решетку, отводя часть энергии основного пучка в дифрагированные пучки. Таким образом, достигается модуляция либо ослабление исходного пучка.

35

Данный метод не обладает выраженной селективностью по длинам волн, а также устройство плохо применимо в качестве отражательного модулирующего магнитооптического элемента интегральной фотоники, так как обладает большими размерами, в частности толщиной.

40

Известны также метод и устройство по управлению оптическим сигналом на основе перекачивания оптической энергии в поверхностный плазмон-поляритон (US 8879138, МПК: G02F 1/01). В устройстве применена активная среда, оптические свойства которой могут варьироваться в зависимости от внешнего электрического или магнитного поля. Для управления с помощью магнитного поля используется диэлектрик с примесями магнитных металлов (Ni, Co) либо ферромагнитных гранатов.

45

Данный метод применяется для модулирования излучения в геометрии на пропускание и устройство не пригодно для использования в качестве модулирующего отражательного элемента. Кроме того, устройство обладает большими геометрическими размерами, что не позволяет применять его в качестве элемента интегральной оптики.

Известен также метод поворота плоскости поляризации света и описан способ изготовления устройства для данного метода (US 7965436, МПК: G02F 1/09). Устройство состоит из немагнитного диэлектрического волновода и магнитной оболочки, толщина волновода составляет порядка 50-400 нм. Устройство осуществляет круговой поворот поляризации на 45° при прохождении излучения через 2 мкм среды.

Данный метод не может применяться в геометрии на отражение, и, кроме того, устройство обладает большими размерами.

Наиболее близким к заявляемому способу является метод усиления магнитооптического эффекта Керра за счет применения фотонно-кристаллических периодических структур на поверхности и перекачки энергии падающего излучения в поверхностные плазмоны (US 9110316, МПК: G02F 1/09). В свою очередь экваториальный магнитооптический эффект Керра позволяет модулировать интенсивность отраженного сигнала. Утверждается, по крайней мере, пятикратное усиление экваториального эффекта Керра по сравнению с неструктурированным материалом. В известном решении, в отличие от заявляемого способа, для магнитооптического эффекта Керра используется фотонно-кристаллическая структура толщиной порядка 300 нм. В качестве ферромагнитного металла используется никель, а сам метод ограничено позволяет использовать, например, железо для магнитооптической модуляции. Также рассматриваемая в данном методе двумерная упорядоченная наноструктура не пригодна для использования в качестве модулирующего пропускающего элемента.

Раскрытие изобретения

Задачей изобретения является создание способа магнитооптической модуляции интенсивности оптического излучения при помощи тонкопленочной плазмонной наноструктуры с толщиной активной части менее 200 нм с возможностью работы устройства в геометрии как на пропускание, так и на отражение.

Техническим результатом является управляемая магнитным полем модуляция интенсивности оптического излучения при отражении от или пропускании через структуру, оптическая толщина которой меньше или порядка длины волны модулируемого излучения, что позволяет применять способ в компактных устройствах.

Поставленная задача решается тем, что способ модуляции интенсивности электромагнитного излучения осуществляют с помощью магнитоплазмонного кристалла, включающего прозрачную диэлектрическую подложку с расположенными на ней в слое магнитного граната двумерного массива частиц из благородного металла с субволновыми размерами, погруженный в диэлектрический магнитный слой толщиной не меньше размера частиц, при этом магнитоплазмонный кристалл освещают ТМ-поляризованным излучением оптического или ближнего ИК диапазонов при приложении к диэлектрическому магнитному слою переменного магнитного поля в геометрии магнитооптического экваториального эффекта Керра, обеспечивающего возможность модуляции интенсивности излучения как на пропускание, так и на отражение.

Двумерный массив частиц представляет собой строго периодическую структуру с периодом расположения частиц не менее 200 нм. Для получения максимальной модуляции света величина прикладываемого внешнего магнитного поля должна находиться в области насыщения намагниченности диэлектрического магнитного слоя. В качестве частиц могут быть использованы частицы золота или серебра с размерами от 50 нм до 200 нм.

Оптимальный результат реализуется в геометрии, где внешнее магнитное поле направлено перпендикулярно плоскости падения излучения на структуру

магнитоплазмонного кристалла и параллельно плоскости магнитоплазмонного кристалла, вектор намагниченности магнитного слоя лежит в плоскости магнитоплазмонного кристалла и перпендикулярен плоскости падения света, угол падения света θ на образец не менее 10 градусов, азимутальный угол лежит в диапазоне от 0 до 360 градусов.

Преимущество магнитоплазмонных структур заключается в возможности создания устройств с размерами, не превышающими длину волны излучения. Поэтому использование магнитоплазмонных материалов в качестве устройств, в которых возможны магнитооптические эффекты и которые, кроме того, являются компактными, дает возможность широкого применения таких материалов в различных областях физики, оптики и электроники. Данные преимущества магнитоплазмонных материалов позволили разработать способ модуляции интенсивности прошедшего и отраженного оптического излучения с помощью структуры с размерами меньшими, чем длина волны используемого излучения (например, см. табл. 1).

Краткое описание чертежей

Изобретение поясняется чертежами, где на фиг. 1 представлено схематичное изображение магнитоплазмонного кристалла: двумерный массив золотых наночастиц (2), расположенный на подложке из плавленного кварца (3) и погруженный в слой магнитного граната (1). На фиг. 2 показано изображение магнитоплазмонного кристалла, полученное с помощью атомно-силового микроскопа. Фиг. 3 демонстрирует принципиальную оптическую схему способа модуляции интенсивности электромагнитного излучения, где (4) - система формирования ТМ-поляризованного оптического излучения, (5) - магнитоплазмонный кристалл, (6) - система детектирования оптического излучения. На фиг. 4 представлен график, демонстрирующий спектр пропускания магнитоплазмонного кристалла (кривая 1) для угла падения излучения на кристалл, равного 20 градусам, а также спектр поперечного магнитооптического эффекта Керра (кривая 2) для угла падения излучения, равного 20 градусам.

Осуществление изобретения

Для реализации способа модуляции интенсивности электромагнитного излучения с использованием магнитооптических и плазмонных эффектов необходим двумерный магнитоплазмонный кристалл, состоящий из диэлектрической подложки, двумерного массива (с периодом не менее 200 нм) частиц из благородного металла (например, золото, серебро) с субволновыми размерами от 50 нм до 200 нм, погруженного в диэлектрический магнитный слой толщиной не менее диаметра частиц;

магнитоплазмонный кристалл освещается ТМ-поляризованным излучением с длиной волны от 400 нм до 3000 нм при приложении насыщающего внешнего магнитного поля, например, при помощи катушек индуктивности. Внешнее магнитное поле направлено перпендикулярно плоскости падения света на структуру и параллельно плоскости магнитоплазмонного кристалла, вектор намагниченности магнитного слоя лежит в плоскости магнитоплазмонного кристалла и перпендикулярен плоскости падения света. Угол падения излучения θ на образец не менее 10 градусов, азимутальный угол лежит в диапазоне от 0 до 360 градусов. В такой магнитоплазмонной решетке возможно возбуждение квазиволноводной и плазмонной мод в спектральном диапазоне падающего излучения. Из-за возбуждения мод происходит перераспределение энергии между падающим электромагнитным излучением и модами, возбуждаемыми в кристалле, и, как следствие, в спектрах отраженного и прошедшего излучения появляются резонансные особенности - наблюдаются локальные максимумы/минимумы.

Указанные параметры магнитоплазмонного кристалла и оптической схемы являются

необходимыми и достаточными для получения заявляемого технического результата.

Ниже представлен пример реализации способа модуляции интенсивности света с использованием квадратной решетки из золотых частиц в железо-иттриевом гранате. Способ основан на использовании двумерного магнитоплазмонного кристалла (фиг.

5 1), состоящего из кварцевой подложки (1), «квадратного» массива золотых частиц размером 110 нм и с периодом $d=600$ нм (2), погруженных в пленку железо-иттриевого граната толщиной 100 нм (3). Для кристалла с таким дизайном возможно возбуждение локальных плазмонов в золотых наночастицах, квазиволноводных мод, локализованных внутри магнитного металла между рядами, а также связанных плазмонных мод.

10 Магнитоплазмонный кристалл может быть получен по известной из уровня техники технологии (см., например, Н. Uchida, Y. Mizutani, Y. Nakai, A.A. Fedyanin, M. Inoue, Garnet composite films with Au particles fabricated by repetitive formation for enhancement of Faraday effect, J. Phys. D: Appl. Phys. 44 (2011) 064014). Массив золотых нанодисков на кварцевой подложке изготавливается с помощью электронно-лучевой литографии

15 после магнетронного распыления золотой пленки. Для получения золотых частиц массив отжигается в течение 10 минут при температуре 1000°C . Далее с помощью магнетронного распыления получают верхний слой магнитного граната с последующим отжигом структуры. Намагниченность структуры лежит в плоскости структуры. Данный метод изготовления магнитоплазмонного кристалла демонстрирует хорошую

20 периодичность решетки (фиг. 2). Для реализации данного способа модуляции света исходное излучение, длина волны которого принадлежит диапазону 400-3000 нм, следует направить в геометрии на отражение/пропускание на магнитоплазмонный кристалл, помещенный в насыщающее переменное магнитное поле. Внешнее магнитное поле направлено перпендикулярно плоскости падения света на структуру и параллельно

25 плоскости магнитоплазмонного кристалла, вектор намагниченности магнитного слоя лежит в плоскости магнитоплазмонного кристалла и перпендикулярен плоскости падения света. Угол падения света подбирается таким образом, чтобы выполнить условия фазового синхронизма между проекцией волнового вектора падающего оптического излучения, вектором поверхностного плазмон-поляритона и вектором

30 обратной решетки магнитоплазмонного кристалла. В результате отраженное/прошедшее излучение будет модулировано на частоте магнитного поля.

В состав кристалла входит слой магнитного граната, для которого наблюдается магнитооптический эффект Керра, а вследствие возбуждения квазиволноводной и плазмонной мод происходит усиление этого эффекта. Изменения свойств мод золотой

35 решетки, обусловленные намагниченностью, приводят к тому, что появляется резонансная зависимость отклика в дальнем поле. В ходе эксперимента была выявлена явная взаимосвязь между положением резонанса мод, возбуждаемых в кристалле, и резонанса поперечного магнитооптического эффекта Керра (фиг. 4). Экваториальный магнитооптический эффект Керра заключается в изменении интенсивности и фазы

40 электромагнитного излучения при взаимодействии с намагниченной средой, для которой вектор намагниченности лежит в плоскости образца и перпендикулярен плоскости падения света. В предлагаемом способе на магнитоплазмонный кристалл падает ТМ-поляризованная волна, для модуляции отклика в дальнем поле используется переменное насыщающее магнитное поле с амплитудой 1 кЭ. Частота магнитного поля не должна

45 совпадать с частотой механических резонансов магнитоплазмонного кристалла или частотой, используемой в электрической сети (50 Гц) для уменьшения шумов.

Особенность используемой в данном изобретении геометрии заключается в том, что экваториальный магнитооптический эффект Керра наблюдается не только в геометрии

на отражение, но и в геометрии на пропускание (фиг. 3). В последнем случае величина эффекта определяется следующим образом:

$$\delta = (T(+H) - T(-H)) / T(0), \quad (1)$$

5 где H - величина приложенного магнитного поля, $T(H)$ - интенсивность прошедшего электромагнитного излучения при приложении магнитного поля величиной H , $T(0)$ - величина интенсивности прошедшего света без приложения магнитного поля. Данный эффект четный по намагниченности, то есть δ меняет свой знак при изменении направления внешнего магнитного поля на противоположное или при изменении угла падения θ на $-\theta$.

10 На фиг. 4 представлен спектр пропускания магнитоплазмонного кристалла для угла падения электромагнитного излучения на структуру равного 20° (кривая 1) и спектр магнитооптического эффекта Керра (кривая 2) в геометрии на пропускание для того же угла. Провал в спектре пропускания на длине волны 840 нм соответствует 15 плазмонной моде, а особенности в спектре пропускания при длине волны вблизи 560 нм связаны с возбуждением квазиволноводной моды. При возбуждении мод в магнитоплазмонном кристалле происходит длительное взаимодействие падающего излучения со средой, что приводит к увеличению магнитооптического отклика. Из графика видно, что в диапазоне от 525 нм до 575 нм вследствие возбуждения 20 квазиволноводной моды происходит усиление магнитооптического эффекта Керра. Таким образом, приложение внешнего магнитного поля к магнитоплазмонному кристаллу позволяет изменить интенсивность прошедшего излучения на величину δ , что не менее 0.04% на 100 нм толщины структуры (фиг. 4).

25 Так как в данном изобретении используется прозрачный ферромагнитный материал, который не только пропускает падающее излучение, но и отражает его, то предложенный способ модуляции интенсивности излучения может работать как на пропускание, так и на отражение.

Настоящее изобретение представлено в виде определенного примера, который, однако, не является единственно возможным, но наглядно демонстрирует возможность 30 достижения требуемого технического результата.

В результате того, что с помощью периодического структурирования магнитоплазмонных кристаллов на микромасштабах удается модулировать интенсивность оптического излучения, а использование диэлектрического магнитного материала, такого как, например, железо-иттриевый гранат, позволяет регистрировать 35 и прошедшее, и отраженное излучение, то появляется возможность применения заявляемого изобретения в качестве универсальных компактных магнитооптических материалов, управляемых внешним магнитным полем, которые работают как на пропускание, так и на отражение.

40 Таким образом, предлагается способ модуляции интенсивности прошедшего или отраженного электромагнитного излучения с помощью структуры с размерами меньше, чем длина волны используемого излучения, который заключается в том, что поверхность магнитоплазмонного кристалла в виде периодически наноструктурированных ферромагнитных и благородных металлов освещается оптическим излучением при одновременном приложении переменного магнитного поля, перпендикулярного 45 плоскости падения света и параллельно плоскости магнитоплазмонного кристалла. Дизайн структуры определяется рабочей длиной волны оптического излучения (табл. 1). Модулирование интенсивности прошедшего или отраженного света осуществляется изменением амплитуды и знака приложенного магнитного поля (за счет изменения

силы и направления тока в электромагнитах, создающих это поле).

Таблица 1.

Соответствие рабочей длины волны падающего излучения и толщины диэлектрического магнитного слоя в двумерной магнитоплазменной структуре.

| | | | | | | | |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| Толщина диэлектрического магнитного слоя h , нм | 110 | 130 | 150 | 170 | 190 | 210 | 230 |
| Рабочая длина волны λ , нм | 538 | 622 | 708 | 790 | 876 | 961 | 1045 |

Таким образом, заявляемый способ позволяет модулировать интенсивность электромагнитного излучения в двух геометриях при помощи магнитоплазменного кристалла, активная часть которого имеет размеры меньше, чем длина волны используемого излучения.

(57) Формула изобретения

1. Способ модуляции интенсивности электромагнитного излучения с помощью магнитоплазменного кристалла, включающего прозрачную диэлектрическую подложку, двумерный массив частиц из благородного металла с субволновыми размерами, погруженный в диэлектрический магнитный слой толщиной не меньше размера частиц, характеризующийся тем, что магнитоплазменный кристалл освещают ТМ-поляризованным излучением оптического или ближнего ИК диапазонов при приложении к диэлектрическому магнитному слою переменного магнитного поля в геометрии магнитооптического экваториального эффекта Керра, обеспечивающего возможность модуляции интенсивности излучения как на пропускание, так и на отражение.

2. Способ по п. 1, характеризующийся тем, что двумерный массив частиц представляет собой периодическую структуру с периодом расположения частиц не менее 200 нм.

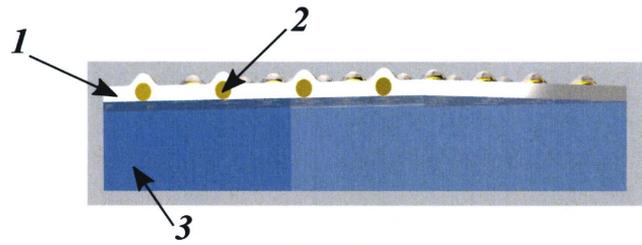
3. Способ по п. 1, характеризующийся тем, что величина прикладываемого внешнего магнитного поля соответствует области насыщения намагниченности диэлектрического магнитного слоя.

4. Способ по п. 1, характеризующийся тем, что в качестве частиц используют частицы золота или серебра с размерами от 50 нм до 200 нм.

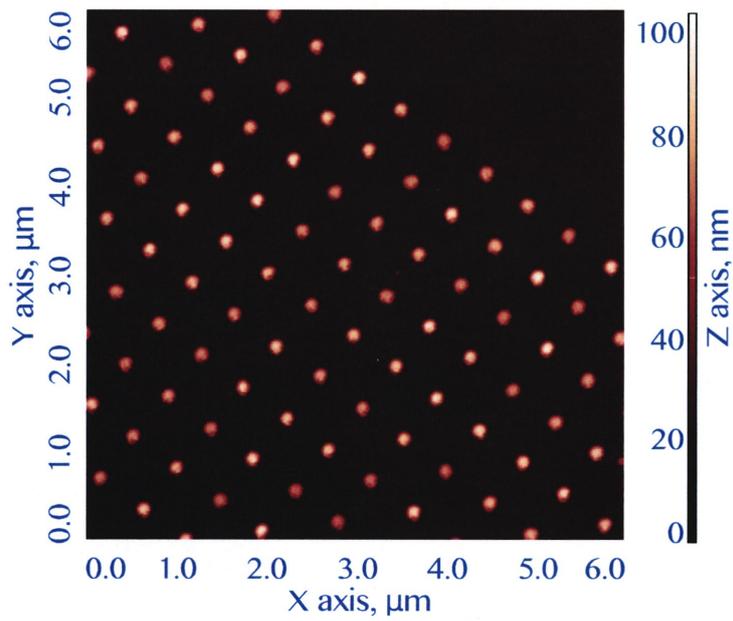
5. Способ по п. 1, характеризующийся тем, что внешнее магнитное поле направлено перпендикулярно плоскости падения излучения на структуру магнитоплазменного кристалла и параллельно плоскости магнитоплазменного кристалла, вектор намагниченности магнитного слоя лежит в плоскости магнитоплазменного кристалла и перпендикулярен плоскости падения света, угол падения излучения θ на образец не менее 10 градусов, азимутальный угол магнитоплазменного кристалла лежит в диапазоне от 0 до 360 градусов.

1

СПОСОБ МОДУЛЯЦИИ ИНТЕНСИВНОСТИ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С
ПОМОЩЬЮ МАГНИТОПЛАЗМОННОГО
КРИСТАЛЛА



Фиг. 1

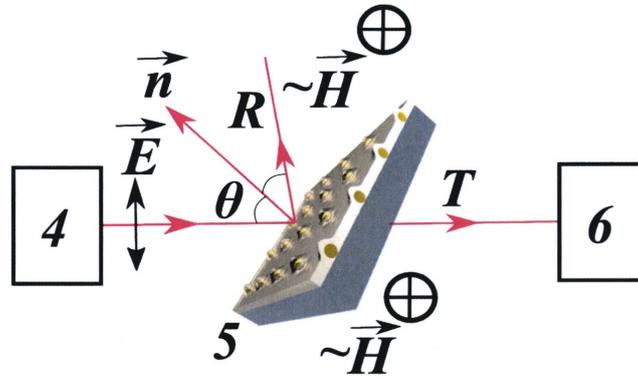


Фиг. 2

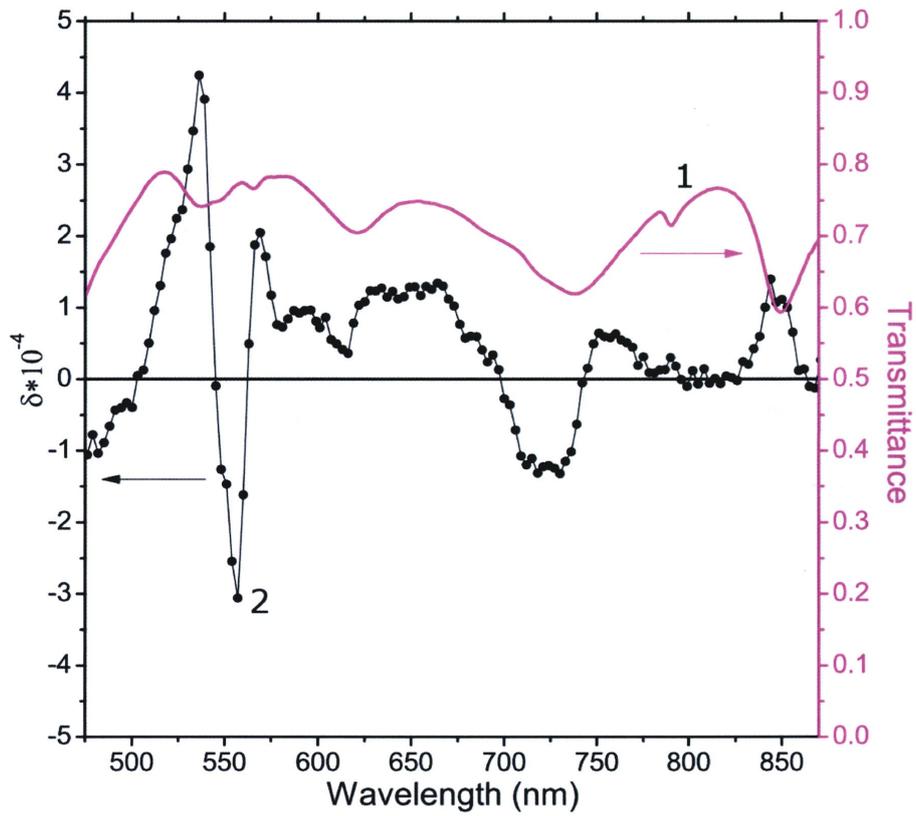
1

2

СПОСОБ МОДУЛЯЦИИ ИНТЕНСИВНОСТИ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С
ПОМОЩЬЮ МАГНИТОПЛАЗМОННОГО
КРИСТАЛЛА



Фиг. 3



Фиг. 4