

Оптическое выделение контуров пропускающими структурами металл–диэлектрик–металл

Д.В. Нестеренко^{1,2}, А.А. Морозов¹, Л.Л. Досколович^{1,2}

¹ ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,
443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 151;

² Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,
443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, д. 34

Аннотация

Экспериментально исследуется возможность реализации аналогового оптического выделения контуров на изображениях оптических объектов на основе пропускающих слоистых резонансных структур металл–диэлектрик–металл. Исследуемая структура на стеклянной подложке, состоящая из тонких слоёв алюминия, разделённых слоем кварца, характеризуется появлением резонансов в пространственном и частотном спектрах пропускания. В работе исследована возможность применения этих структур для оптического выделения контуров на изображениях объекта в проходящем свете на основе подавления освещающего пучка и усиления излучения, рассеянного на краях объекта. Анализ угловых спектров пропускания структур металл–диэлектрик–металл для расходящихся освещающих пучков показал зависимость направленности преимущественного выделения контуров от наклона структуры. Экспериментально продемонстрированы эффект выделения контуров на изображениях оптических элементов, а также зависимость его направленности от преимущественного направления градиента неоднородностей объекта в случае наклонного расположения структуры. Полученные результаты могут найти применение в системах оптической обработки информации и оптической фильтрации.

Ключевые слова: оптические резонансы, слоистые структуры, металлдиэлектрическая система слоев, оптическое выделение контуров.

Цитирование: Нестеренко, Д.В. Оптическое выделение контуров пропускающими структурами металл–диэлектрик–металл / Д.В. Нестеренко, А.А. Морозов, Л.Л. Досколович // Компьютерная оптика. – 2021. – Т. 45, № 5. – С. 678–684. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-853.

Citation: Nesterenko DV, Morozov AA, Doskolovich LL. Optical image edge detection by transmissive metal-dielectric-metal structures. Computer Optics 2021; 45(5): 678-684. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-853.

Введение

Реализации полностью оптических преобразований оптических сигналов и изображений уделяется значительное внимание, поскольку это открывает возможности к осуществлению сверхбыстрых аналоговых потоковых преобразований [1, 2]. Переход от традиционных оптических систем на основе громоздких систем линз и фильтров к миниатюрным системам, не требующим выполнения преобразования Фурье, может быть осуществлён на основе резонансных оптических структур.

Большой интерес вызывает выполнение операций оптического дифференцирования и интегрирования различных порядков, преобразования Лапласа [3–6]. Точное выполнение этих операций требует подобия зависимости коэффициента отражения от пространственной или временной частоты этих структур передаточным функциям соответствующих операторов. Так, были получены аппроксимации резонансных спектров отражения (пропускания) дифракционных [3, 7–10], слоистых плазмонных [11, 12] и волноводных [13] структур, границ раздела диэлектрических

сред [14–18], характеризуемые различными спектральными диапазонами их применимости, а также различной шириной резонансов.

Кроме того, для выполнения полностью оптических вычислений были предложены трёхмерные оптические структуры [1, 19–21] на основе метаповерхностей в виде массива нанорезонаторов. Следует отметить, что изготовление резонансных слоистых структур существенно менее трудоёмко по сравнению с процессами изготовления метаповерхностей и дифракционных двухмерных и трёхмерных структур.

Подходы к оптическому дифференцированию на основе слоистых структур были теоретически исследованы и экспериментально продемонстрированы на примере выделения контуров на изображениях амплитудных и фазовых образцов для р-поляризованных пучков. Так, описывалось применение резонансов в спектрах нарушенного полного внутреннего отражения тонких металлических плёнок в конфигурации Кречмана, ассоциируемые с возбуждением плазмонной моды [11, 12], а также резонансного уменьшения отражения от грани стеклянной призмы при падении пучка под углом Брюстера

[15–18]. Теоретически, операция дифференцирования требует достижения строгого нуля на центральной частоте, что осуществляется в экспериментах на основе эффекта Брюстера. Несмотря на то, что плазмонные структуры, описанные в [11], не были оптимизированы для достижения строгого нуля, для них продемонстрировано эффективное выделение контуров с подавлением фона. Таким образом, структуры, передаточные функции которых отличны от идеальных, могут применяться в областях оптической информатики, не требующих точной обработки информации.

Значительное количество работ было посвящено исследованию оптических характеристик отражающих структур типа металл–диэлектрик–металл (МДМ), один из слоёв металла которой является оптически толстым. Возбуждение собственных мод МДМ-структур приводит к резонансному усилению поглощения света и появлению резонансов в спектрах отражения [22–27]. Применение отражающих структур для обработки изображений требует разделения падающего и отражённого пучков, что усложняет оптическую схему.

МДМ-структура, в которой слои металла достаточно тонкие для регистрации спектров пропускания, позволяет использовать более простую оптическую схему. В этом случае МДМ-структура рассматривается как резонатор Фабри–Перо с поглощающими зеркалами [28]. При резонансных условиях интерференция многократно переотражённых лучей в диэлектрическом слое приводит к усилению поля их интерференции. Теоретическое и экспериментальное исследование спектров пропускания показали, что возбуждение в структуре мод Фабри–Перо приводит к появлению в спектрах пропускания областей резонансного увеличения пропускания [28]. Резонансные области разделяются областями минимального пропускания. Однако возможность достижения строгого нуля в минимумах пропускания таких структур выяснена не была.

На основе исследований резонансного отклика структур МДМ, работающих на пропускание, можно предположить, что операция оптического дифференцирования не может быть точно реализована. Резонансный профиль в спектрах таких структур потенциально может быть использован для осуществления оптического подавления интенсивности направленного излучения источника относительно интенсивности рассеянных на объекте волн.

В настоящей работе впервые исследуется возможность применения резонансных пропускающих слоистых структур МДМ на стеклянной подложке на основе слоёв алюминия (Al), разделённых слоем диоксида кремния (SiO₂), для полностью оптического выделения контуров на изображениях оптических структур. Из результатов работы следует, что резонансные структуры МДМ могут эффективно приме-

няться для неточной обработки оптических сигналов в проходящем свете.

1. Описание структуры МДМ

Для экспериментальной демонстрации была изготовлена структура вида металл–диэлектрик–металл, а именно последовательно нанесённые на подложку из стекла К8 слой Al толщиной 20 нм, слой SiO₂ толщиной 4022 нм и слой Al толщиной 20 нм. Изготовление слоёв проводилось на установке магнетронного нанесения (Изовак) в автоматическом режиме в течение времени, рассчитанного на основе средней скорости напыления каждого материала в отдельности, при давлении не более 3×10^{-3} Па [28].

Спектры пропускания были получены измерениями на спектрофотометре Photon RT (ЕссентОптикс) в воздухе и представлены на рис. 1 как функции угла падения θ волны на структуру к её нормали и длины волны луча. Теоретическое моделирование спектров пропускания структуры Al/SiO₂/Al показало, что возникновение максимумов пропускания величиной более 1,5 % на фоне минимумов величиной менее 0,1 % происходит благодаря резонансному возбуждению мод Фабри–Перо различных порядков. Возбуждение мод, характеризующее резонансным усилением пропускания, происходит при больших углах падения для меньших длин волн. Как видно на рис. 1, кривые возбуждения мод располагаются под небольшим углом к оси угла падения, что предполагает малую ширину резонансов в частотных спектрах и большую ширину – в пространственных. С увеличением угла падения наклон кривых к оси угла падения увеличивается, что предполагает уменьшение угловой ширины резонанса, а также углового расстояния между близкими резонансами.

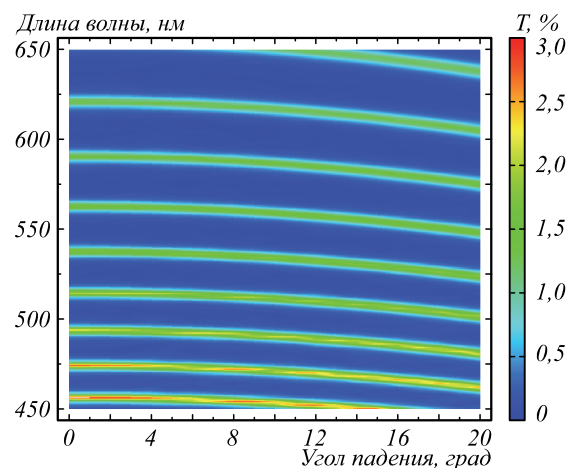


Рис. 1. Распределение измеренной пропускающей способности T структуры Al/SiO₂/Al для широкого диапазона длин волн

Для демонстрации зависимости ширины резонанса и расстояния между резонансами от угла падения угловые спектры пропускающей способности структуры МДМ для ряда значений длин волн приводятся

на рис. 2. Определим контраст структуры как $K(\theta, |\theta_{\max} - \theta|) = T(\theta_{\max}) / T(\theta)$, где θ_{\max} – значение угла падения волны на структуру к её нормали, для которого наблюдается резонансный максимум, при этом значение θ_{\max} – ближайшее к значению угла падения коллимированного пучка θ . Отметим, что в соответствии с измеренными данными, для нормального падения пучка контраст возрастает с удалением положения резонансного максимума пропускания θ_{\max} от нормального падения от $K(0, 8^\circ) = 2,5$ при 561 нм до $K(0, 17^\circ) = 17$ при 555 нм.

Выделение контуров на изображениях оптических объектов производится за счет фильтрации углового спектра, в результате которой интенсивность фонового излучения становится ниже интенсивности рассеянного на краях излучения.

В случае использования эффекта Брюстера (угол падения пучка на границу раздела двух диэлектрических сред равен углу Брюстера θ_{Br}) оценки значений контраста коэффициента отражения структуры, необходимого для эффективного выделения контуров изображения объекта относительно падающего излучения, составляют, например, $K(\theta_{Br}, 1^\circ) = 100$ и $K(\theta_{Br}, 3^\circ) = 1000$ [15–18]. Таким образом, значения контраста, достигаемые в изготовленной структуре Al/SiO₂/Al для углов вблизи нормального падения, недостаточны для использования данного образца для задачи выделения контуров при нормальном падении. Теоретические исследования структур на основе серебра (Ag) [29] показали, что в случае нормального падения контраст может быть увеличен на порядок по сравнению со значениями структур на основе Al. Однако наши эксперименты продемонстрировали значительное ухудшение контраста при окислении Ag, возникающем при изготовлении структур или при нахождении образцов структур в атмосфере.

В соответствии с рис. 2 достижение приемлемых уровней контраста для меньших отклонений положения максимума пропускания от угла падения пучка возможно для больших углов падения пучка. В случае $\theta = 48,3^\circ$ контраст $K(48,3^\circ, 3^\circ) = 7$ при 561 нм до $K(48,3^\circ, 5,1^\circ) = 11$ при 555 нм.

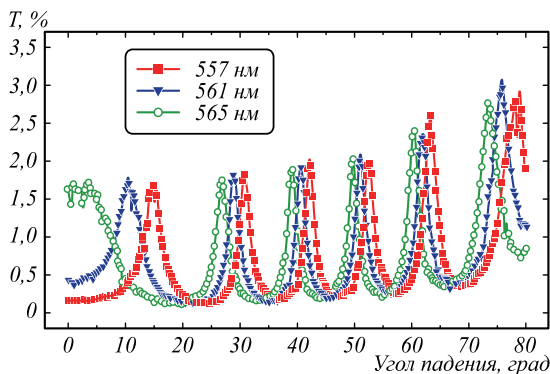


Рис. 2. Измеренные угловые спектры пропускающей способности структуры Al/SiO₂/Al для значений длин волн в диапазоне 557–565 нм

2. Преобразование Гауссовых пучков

Оптическая система схематично изображена на рис. 3. В качестве источника света был использован перестраиваемый лазер EKSPALA NT242. Регулировка мощности выходного пучка осуществлялась фильтром нейтральной оптической плотности ND. Поляризатор P настроен на пропускание р-поляризованного излучения, при этом колебания электрического вектора происходят в плоскости падения луча. Расширение и коллимация пучка осуществлялись коллиматором, состоящим из микрообъектива M и линзы L_1 , а также пинхола (апертуры) A , расположенного в фокальной плоскости микрообъектива и линзы.

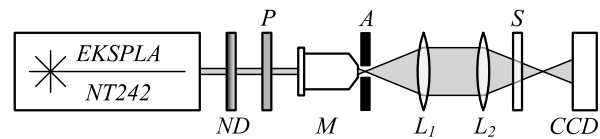


Рис. 3. Оптическая схема для демонстрации углового спектра пропускания изготовленной резонансной структуры S

Сколлимированный пучок фокусируется линзой L_2 . На расстоянии, большем, чем фокусное расстояние линзы L_2 , располагается ПЗС-матрица CCD. Между линзой и ПЗС-матрицей помещается образец структуры МДМ S , установленный перпендикулярно оптической оси. Такая оптическая схема позволяет осуществлять регистрацию угловых спектров пропускания образца S . При этом распределение интенсивности $I(x, y)$, зарегистрированное ПЗС-матрицей в декартовой системе координат, в полярной системе координат соответствует спектральному распределению $I(\theta, \phi) = I(x, y)$, где $\phi = \text{atan}(y/x)$ и $\theta = \text{atan}(r/d)$, где r – радиус зарегистрированного кольца, d – расстояние от фокальной плоскости линзы L_2 до ПЗС-матрицы, как показано на рис. 4.

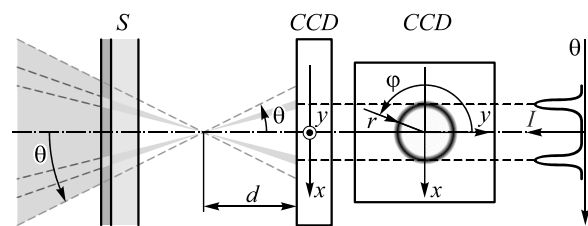


Рис. 4. Оптическая схема преобразования пучка фильтрацией углового спектра образцом S в случае нормального падения

На рис. 5 приведены экспериментально полученные изображения р-поляризованных Гауссовых пучков после прохождения структуры для ряда значений длин волн. Исследуемая структура не производит точной операции дифференцирования из-за невозможности достижения строгого нуля при нормальном падении. Кроме того, в [28] было теоретически показано, что резонансные максимумы в спектрах вблизи нормального падения аппроксимируются функциями

Лоренца, тогда как подобной зависимости для резонансных минимумов получено не было. Из рис. 5 видно, что угловые спектры пучка, прошедшего структуру, обладают центральной симметрией с хорошей равномерностью интенсивности по ϕ , что согласуется с теоретическими выводами в [28] о пренебрежимо малом влиянии поляризации на положение резонанса θ_{res} при падении пучка, близком к нормальному. Кольца в изображениях преобразованных пучков характеризуются угловой шириной, соответствующей нескольким градусам, как следует из распределений угловых спектров, представленных на рис. 1. Контраст преобразованного структурой Гауссова пучка как отношение значений интенсивности на кольце к значениям интенсивности в центре принимает значения в диапазоне 1,5 – 2,5.

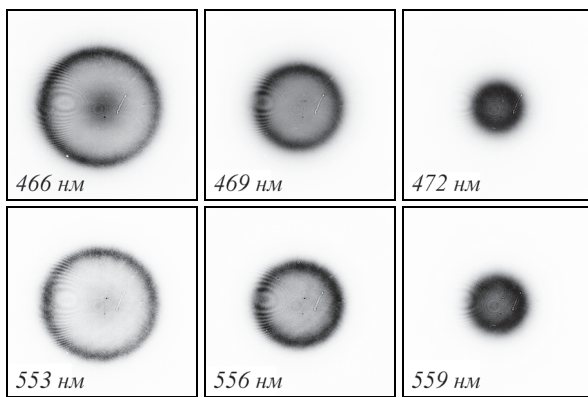


Рис. 5. Примеры экспериментальных изображений углового распределения пучков в случае нормального падения для отдельных значений длин волн

Для качественной демонстрации принципиальной возможности осуществления оптической операции выделения контуров на изображениях с использованием структур МДМ мы провели эксперимент с образцом $Al/SiO_2/Al$, расположенным под углом к оптической оси α . При этом симметрия преобразования пучка по угловому спектру нарушается, как схематично изображено на рис. 6. На рис. 7 приведены результаты экспериментальных измерений пространственных спектров пучков, прошедших структуру в случае $\alpha = 40^\circ$, для длин волн 553 нм, 556 нм и 559 нм. Как видно из рисунка, спектральный состав излучения представляется в виде концентрических дуг, положение которых сдвигается к центру с увеличением длины волны. В случае наклонного положения ПЗС-матрицы параллельно структуре S регистрируются концентрические окружности. Пересечение вертикальных линий на рис. 7 обозначает положение лучей, распространяющихся вдоль оптической оси.

Как видно на рис. 7, угловое расстояние от направления нормального падения до направления максимумов пропускания для волн рассеянного излучения, распространяющихся в горизонтальной плоскости, меньше, чем для волн, распространяющихся в вертикальной плоскости. Это является причиной за-

висимости эффективности выделения контуров на основе подсвечивания рассеянного излучения от преимущественного направления рассеяния, как будет показано ниже.

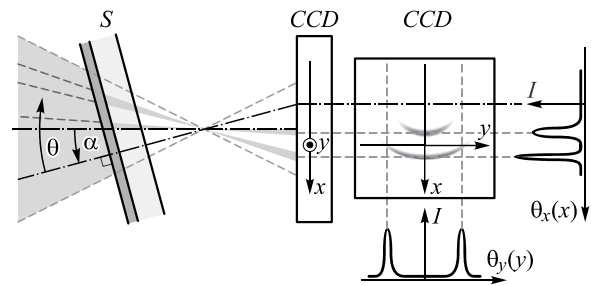


Рис. 6. Оптическая схема преобразования пучка фильтрацией углового спектра образцом S в случае наклонного падения

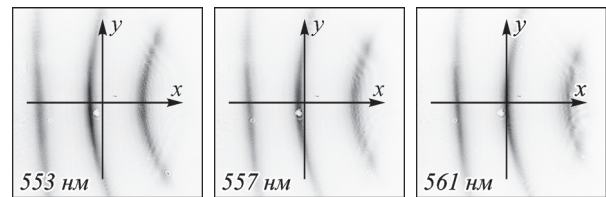


Рис. 7. Экспериментальные изображения углового распределения пучков в случае наклонного падения для отдельных значений длин волн

3. Экспериментальная демонстрация выделения контуров изображения фазового объекта

Для демонстрации оптического выделения контуров схема, представленная на рис. 3, перестроена, как показано на рис. 8. Пучок, коллимированный линзой L_1 , освещает объект O . На расстоянии от f_2 до $2f_2$ от объекта O размещается линза L_2 , где f_2 – фокусное расстояние линзы L_2 . На расстоянии, большем f_2 , от линзы L_2 помещается ПЗС-матрица CCD для регистрации изображения объекта O . Структура для оптического преобразования размещается на любом расстоянии между объектом O и линзой L_2 . В качестве фазового объекта используется маска в прозрачной плёнке полимера с показателем преломления 1,46 на 532 нм и толщиной 550 нм на стеклянной подложке.

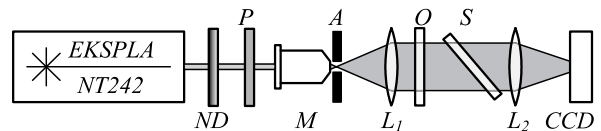


Рис. 8. Оптическая схема выделения контуров на изображении объекта O в случае наклонного падения освещающего пучка на резонансную структуру S

Рассмотрим формирование оригинального изображения объекта без резонансной структуры МДМ. Маска состоит из перекрещенных полос шириной 100 мкм. Пучок, прошедший через подложку и полимер, приобретает набег фазы по сравнению с пучком, прошедшим только подложку. На матрице CCD изменение фазы не регистрируется. Поглощение полимера мало, показатели преломления полимера и стек-

лянной подложки имеют близкие значения, поэтому интенсивность изображения объекта сопоставима для областей, покрытых полимером, и без покрытия. Вдали от краев маски, где происходит рассеяние падающей волны, направление пучка не меняется. В окрестности краев маски происходит скачок фазы и возникает прошедшее и отражённое рассеянное излучение, распространяющееся в прямом и обратном направлениях соответственно. Это приводит к уменьшению интенсивности краёв объекта на оригинальном изображении, как видно на рис. 9а.

В краевых областях в результате дифракции на неоднородностях объекта наблюдается модуляция интенсивности, как можно увидеть на рис. 9а. При смещении объекта вдоль оптической оси или его отклонении от плоскости изображения амплитуда модуляции возрастает с размытием изображения объекта. Появляющиеся в результате дифракции вторичные контуры изотропно огибают границы объекта. Для минимизации влияния дифракции на изображение, плоскости линз, объекта и ПЗС-матрицы располагались перпендикулярно оптической оси по отраженному пучку. Настройка положения ПЗС-матрицы вдоль оптической оси осуществлялась для достижения максимального контраста изображения.

Для проверки осуществимости выделения контуров на основе резонансного пропускания структура Al/SiO₂/Al устанавливалась под углом α к оптической оси. Сканированием длины волны перестраиваемого лазера изменялись резонансные характеристики структуры и, соответственно, режим преобразования изображения.

В случае установки структуры в плоскости, перпендикулярной оптической оси ($\alpha = 0^\circ$), приемлемые результаты, демонстрирующие выделение контуров на изображениях, не были получены. При установке структуры под углом α около 40° типичные изображения, полученные в результате преобразования, представлены на рис. 9б и 9в.

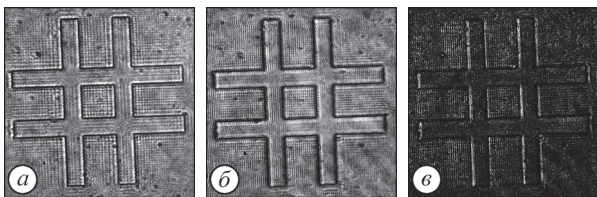


Рис. 9. Изображения фазового образца: оригинальное (длина волны 561 нм) (а) и преобразованное с использованием структуры МДМ, установленной под наклоном $\alpha = 40^\circ$ к оптической оси, при длинах волн 561 нм (б) и 557 нм (в)

При длине волны 561 нм, согласно рис. 7б, область максимума пропускания соответствует направлению лучей, распространяющихся вдоль оптической оси. В этом случае пропускание излучения, рассеянного на краях объекта, сопоставимо с пропусканием лучей, распространяющихся вдоль оптической оси. Это приводит к регистрации преобразованного изображения (см. рис. 9б), которое отличается от ориги-

нального большим отклонением яркости фона от яркости краёв.

При уменьшении длины волны на 4 нм до 557 нм согласно рис. 7в направление лучей, рассеянных на краях объекта, соответствует максимуму пропускания в спектре. При этом пропускание падающего пучка принимает значения, близкие к минимальным. Это приводит к регистрации преобразованного изображения (см. рис. 9в), на темном фоне которого наблюдаются вертикальные яркие линии, соответствующие вертикальным краям маски и градиентам неоднородности объекта, направленным в горизонтальной плоскости, которая характеризуется меньшим расстоянием между резонансными максимумами. Линии, соответствующие горизонтальным краям маски, не проявляются, поскольку градиент неоднородности объекта для них направлен в вертикальной плоскости, характеризуемой большим расстоянием между резонансными максимумами. В отличие от дифракционного выделения контуров, в случае использования резонансной структуры подсветки горизонтальных краёв маски, для которых градиент неоднородности направлен в вертикальной плоскости, не происходит. Это объясняется большей угловой шириной между резонансными максимумами в вертикальном направлении, как схематично показано на рис. 6.

Как показано на рис. 9б и 9в, изменение длины волны света на несколько нанометров приводит к качественному изменению характера представления контуров и фона за счет изменения соотношения интенсивностей изображений фона и краёв объекта. Такая сильная зависимость выделения контуров от длины волны не характерна для дифракционных эффектов. Таким образом, экспериментально наблюдаемые эффекты выделения контуров ассоциируются с оптической фильтрацией, выполняемой резонансными структурами МДМ.

Заключение

Проведенное экспериментальное исследование впервые демонстрирует принципиальную возможность применения резонансных структур МДМ, работающих на пропускание, для оптической обработки изображений. Проведённый анализ пространственных спектров пропускания МДМ структур на основе слоя кварца, заключённого между слоями алюминия, показал наличие достаточно узких и высоких резонансов в области наклонного падения. Использование резонансных свойств структур МДМ позволило осуществить эффективное выполнение пространственной операции выделения контуров на изображениях объектов в случае наклонного падения. В отличие от эффектов, вызванных дифракцией, выделение контуров изображения на основе структур МДМ осуществляется для определённых длин волн в узких диапазонах угла падения освещающего пучка.

Планируется провести изучение возможности выделения контуров для случая нормального падения в

следующих экспериментальных исследованиях. Полученные результаты могут быть использованы для создания компактных систем сверхбыстрых аналоговых вычислений и обработки изображений реального времени, для расширения возможностей существующих и для создания новых оптических устройств, в том числе систем на чипе.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН (соглашение № 007-ГЗ/Ч3363/26) в части постановки задачи и Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 18-29-20006 и 18-07-00613) в частях теоретического, численного и экспериментального исследований.

Литература

1. **Silva, A.** Performing mathematical operations with metamaterials / A. Silva, F. Monticone, G. Castaldi, V. Galdi, A. Alù, N. Engheta // *Science*. – 2014. – Vol. 343, Issue 6167. – P. 160-163. – DOI: 10.1126/science.1242818.
2. **Solli, D.R.** Analog optical computing / D.R. Solli, B. Jalali // *Nature Photonics*. – 2015. – Vol. 9. – P. 704-706.
3. **Bykov, D.A.** Temporal differentiation of optical signals using resonant gratings / D.A. Bykov, L.L. Doskolovich, V.A. Soifer // *Optics Letters*. – 2011. – Vol. 36, Issue 17. – P. 3509-3511. – DOI: 10.1364/OL.36.003509.
4. **Bykov, D.A.** Single-resonance diffraction gratings for time-domain pulse transformations: integration of optical signals / D.A. Bykov, L.L. Doskolovich, V.A. Soifer // *Journal of the Optical Society of America A*. – 2012. – Vol. 29, Issue 8. – P. 1734-1740. – DOI: 10.1364/JOSAA.29.001734.
5. **Doskolovich, L.L.** Spatial differentiation of optical beams using phase-shifted Bragg grating / L.L. Doskolovich, D.A. Bykov, E.A. Bezus, V.A. Soifer // *Optics Letters*. – 2014. – Vol. 39, Issue 5. – P. 1278-1281. – DOI: 10.1364/OL.39.001278.
6. **Bykov, D.A.** Optical computation of the Laplace operator using phase-shifted Bragg grating / D.A. Bykov, L.L. Doskolovich, E.A. Bezus, V.A. Soifer // *Optics Express*. – 2014. – Vol. 22, Issue 21. – P. 25084-25092. – DOI: 10.1364/OE.22.025084.
7. **Bykov, D.A.** First-order optical spatial differentiator based on a guided-mode resonant grating / D.A. Bykov, L.L. Doskolovich, A.A. Morozov, V.V. Podlipnov, E.A. Bezus, P. Verma, V.A. Soifer // *Optics Express*. – 2018. – Vol. 26, Issue 8. – P. 10997-11006. – DOI: 10.1364/OE.26.010997.
8. **Dong, Z.** Optical spatial differentiator based on subwavelength high-contrast gratings / Z. Dong, J. Si, X. Yu, X. Deng // *Applied Physics Letters*. – 2018. – Vol. 112. – 181102.
9. **Bykov, D.A.** Time-domain differentiation of optical pulses in reflection and in transmission using the same resonant grating / D.A. Bykov, L.L. Doskolovich, N.V. Golovastikov, V.A. Soifer // *Journal of Optics*. – 2013. – Vol. 15, Issue 10. – 105703. – DOI: 10.1088/2040-8978/15/10/105703.
10. **Golovastikov, N.V.** Resonant diffraction gratings for spatial differentiation of optical beams / N.V. Golovastikov, D.A. Bykov, L.L. Doskolovich // *Quantum Electronics*. – 2014. – Vol. 44, Issue 10. – P. 984-988. – DOI: 10.1070/QE2014v044n10ABEH015477.
11. **Zhu, T.** Plasmonic computing of spatial differentiation / T. Zhou, Y. Lou, H. Ye, M. Qiu, Z. Ruan, S. Fan // *Nature Communications*. – 2017. – Vol. 8. – 15391. – DOI: 10.1038/ncomms15391.
12. **Ruan, Z.** Spatial mode control of surface plasmon polariton excitation with gain medium: from spatial differentiator to integrator / Z. Ruan // *Optics Letters*. – 2015. – Vol. 40, Issue 4. – P. 601-604.
13. **Golovastikov, N.V.** An optical differentiator based on a three-layer structure with a W-shaped refractive index profile / N.V. Golovastikov, L.L. Doskolovich, E.A. Bezus, D.A. Bykov, V.A. Soifer // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. – 2018. – Vol. 127, Issue 2. – P. 202-209. – DOI: 10.1134/S1063776118080174.
14. **Youssefi, A.** Analog computing by Brewster effect / A. Youssefi, F. Zangeneh-Nejad, S. Abdollahramezani, A. Khavasi // *Optics Letters*. – 2016. – Vol. 41, Issue 15. – P. 3467-3470. – DOI: 10.1364/OL.41.003467.
15. **Нестеренко, Д.В.** Оптическое дифференцирование на основе эффекта Брюстера / Д.В. Нестеренко, М.Д. Колесникова, А.В. Любарская // *Компьютерная оптика*. – 2018. – Т. 42, № 5. – С. 758-763. – DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-5-758-763.
16. **Nesterenko, D.V.** The dependence of the image edge detection directivity by Brewster effect on the gradient of inhomogeneities of objects / D.V. Nesterenko, A.V. Lyubarskaya, M.D. Kolesnikova, V.A. Soifer // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2019. – Vol. 1368. – 022066. – DOI: 10.1088/1742-6596/1368/2/022066.
17. **Kolesnikova, M.D.** The resolution of optical image edge detection based on Brewster effect / M.D. Kolesnikova, A.V. Lyubarskaya, D.V. Nesterenko, V.A. Soifer // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2019. – Vol. 1368. – 022016. – DOI: 10.1088/1742-6596/1368/2/022016.
18. **Nesterenko, D.V.** Brewster effect in the broadband light reflectivity / D.V. Nesterenko, M.D. Kolesnikova, L.V. Lyubarskaya, V.A. Soifer // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2020. – Vol. 1461. – 012116. – DOI: 10.1088/1742-6596/1461/1/012116.
19. **Pors, A.** Analog computing using reflective plasmonic metasurfaces / A. Pors, M.G. Nielsen, S.I. Bozhevolnyi // *Nano Letters*. – 2015. – Vol. 15, Issue 1. – P. 791-797.
20. **Pors, A.** Plasmonic metasurfaces for efficient phase control in reflection / A. Pors, S.I. Bozhevolnyi // *Optics Express*. – 2013. – Vol. 21, Issue 22. – P. 27438-27451.
21. **Chizari, A.** Analog optical computing based on a dielectric meta-reflect array / A. Chizari, S. Abdollahramezani, M.V. Jamali, J.A. Salehi // *Optics Letters*. – 2016. – Vol. 41, Issue 15. – P. 3451-3454.
22. **Shu, S.** Triple-layer Fabry-Perot absorber with near-perfect absorption in visible and near-infrared regime / S. Shu, Z. Li, Y.Y. Li // *Optics Express*. – 2013. – Vol. 21, Issue 21. – P. 25307-25315.
23. **Yan, M.** Metal-insulator-metal light absorber: a continuous structure / M. Yan // *Journal of Optics*. – 2013. – Vol. 15, Issue 2. – 025006.
24. **Cui, Y.** Plasmonic and metamaterial structures as electromagnetic absorbers / Y. Cui, Y. He, Y. Jin, F. Ding, L. Yang, Y. Ye, S. Zhong, Y. Lin, S. He // *Laser and Photonics Reviews*. – 2014. – Vol. 8, Issue 4. – P. 495-520.
25. **Ng, C.** Plasmonic near-complete optical absorption and its applications / C. Ng, L. Wesemann, E. Panchenko, J. Song, T.J. Davis, A. Roberts, D.E. Gómez // *Advanced Optical Materials*. – 2019. – Vol. 7, Issue 14. – 1801660.
26. **Li, Z.** Large-area, lithography-free super absorbers and color filters at visible frequencies using ultrathin metallic films

- / Z. Li, S. Butun, K. Aydin // ACS Photonics. – 2015. – Vol. 2, Issue 2. – P. 183-188.
27. **Wesemann, L.** Selective near-perfect absorbing mirror as a spatial frequency filter for optical image processing / L. Wesemann, E. Panchenko, K. Singh, E. Della Gaspera, D.E. Gómez, T.J. Davis, A. Roberts // APL Photonics. – 2019. – Vol. 4, Issue 10. – 100801.
28. **Нестеренко, Д.В.** Резонансные характеристики пропускающих оптических фильтров на основе структур металл/диэлектрик/металл / Д.В. Нестеренко // Компьютерная оптика. – 2020. – Т. 44, № 2. – С. 219-228. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-681.
29. **Nesterenko, D.** Approximation of Fabry-Pérot resonances in Ag/quartz/Ag structures / D. Nesterenko, S. Hayashi, V. Soifer // 2020 International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT). – 2020. – P. 1-3. – DOI: 10.1109/ITNT49337.2020.9253286.

Сведения об авторах

Нестеренко Дмитрий Владимирович в 1999 году с отличием окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (СГАУ) по специальности «Физика». Кандидат физико-математических наук (2002 год), старший научный сотрудник лаборатории дифракционной оптики ИСОИ РАН – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, доцент кафедры технической кибернетики Самарского национального исследовательского университета. E-mail: nesterenko@smr.ru.

Морозов Андрей Андреевич, 1987 года рождения. В 2010 получил степень магистра в СГАУ по специальности «Прикладная математика и физика». Кандидат физико-математических наук (2014). Научный сотрудник лаборатории микро- и нанотехнологий Института систем обработки изображений РАН – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. В списке научных работ А.А. Морозова 26 статей. Область научных интересов: дифракционная оптика, оптическое микроманипулирование. E-mail: ragefalcon@mail.ru.

Досколович Леонид Леонидович в 1989 году с отличием окончил Куйбышевский авиационный институт (КуАИ, ныне – Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева) по специальности «Прикладная математика». Доктор физико-математических наук (2001 год), профессор, работает ведущим научным сотрудником лаборатории дифракционной оптики ИСОИ РАН – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, профессором кафедры технической кибернетики Самарского университета. Специалист в области дифракционной оптики, лазерных информационных технологий, нанофотоники. E-mail: leonid@ipsiras.ru.

ГРНТИ: 29.31.26

Поступила в редакцию 22 декабря 2020 г. Окончательный вариант – 25 мая 2021 г.

Optical image edge detection by transmissive metal-dielectric-metal structures

D.V. Nesterenko^{1,2} A.A. Morozov¹, L.L. Doskolovich^{1,2}

¹ IPSTI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS,
Molodogvardeyskaya 151, 443001, Samara, Russia;

² Samara National Research University, Moskovskoye Shosse 34, 443086, Samara, Russia

Abstract

The feasibility of an optical image edge detection based on metal-insulator-metal (MIM) resonance transmission structures is experimentally investigated. The structures are fabricated on a glass substrate and consist of thin aluminum layers separated by a quartz layer. The excitation of Fabry-Perot modes by an incident wave produces resonance line shapes in angular and wavelength transmission spectra. Resonance enhancement and suppression of beams using the MIM structures can be implemented for suppressing the illuminating beam and amplifying the field scattered by an object. By using the MIM structure under oblique incidence, we experimentally observe the efficient image edge detection for phase optical elements at a set of wavelengths. The obtained images of edges of the elements exhibit a directionality of image edge detection that depends on the direction of inhomogeneity gradient in the object plane, as suggested by the angular transmission spectra of the MIM structures. The results of the present work can find applications in optical information processing and optical filtering systems.

Keywords: optical resonances, planar structures, metal-dielectric multilayer, optical image edge detection.

Citation: Nesterenko DV, Morozov AA, Doskolovich LL. Optical image edge detection by transmissive metal-dielectric-metal structures. *Computer Optics* 2021; 45(5): 678-684. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-853.

Acknowledgements: This work was partly funded by the Russian Federation Ministry of Science and Higher Education within the State assignment of the FSRC «Crystallography and Photonics» RAS under agreement 007-Г3/Ч3363/26 (the design of experiment) and the Russian Foundation for Basic Research under Projects Nos. 18-29-20006 and 18-07-00613 (experimental studies).

References

- [1] Silva A, Monticone F, Castaldi G, Galdi V, Alù A, Engheta N. Performing mathematical operations with metamaterials. *Science* 2014; 343: 160-163. DOI: 10.1126/science.1242818.
 - [2] Solli DR, Jalali B. Analog optical computing. *Nat Photon* 2015; 9: 704-706.
 - [3] Bykov DA, Doskolovich LL, Soifer VA. Temporal differentiation of optical signals using resonant gratings. *Opt Lett* 2011; 36(17): 3509-3511. DOI: 10.1364/OL.36.003509.
 - [4] Bykov DA, Doskolovich LL, Soifer VA. Single-resonance diffraction gratings for time-domain pulse transformations: integration of optical signals. *J Opt Soc Am A* 2012; 29(8): 1734-1740. DOI: 10.1364/JOSAA.29.001734.
 - [5] Doskolovich LL, Bykov DA, Bezus EA, Soifer VA. Spatial differentiation of optical beams using phase-shifted Bragg grating. *Opt Lett* 2014; 39(5): 1278-1281. DOI: 10.1364/OL.39.001278.
 - [6] Bykov DA, Doskolovich LL, Bezus EA, Soifer VA. Optical computation of the Laplace operator using phase-shifted Bragg grating. *Opt Express* 2014; 22(21): 25084-25092. DOI: 10.1364/OE.22.025084.
 - [7] Bykov DA, Doskolovich LL, Morozov AA, Podlipnov VV, Bezus EA, Verma P, Soifer VA. First-order optical spatial differentiator based on a guided-mode resonant grating. *Opt Express* 2018; 26(8): 10997-11006. DOI: 10.1364/OE.26.010997.
 - [8] Dong Z, Si J, Yu X, Deng X. Optical spatial differentiator based on subwavelength high-contrast gratings. *Appl Phys Lett* 2018; 112: 181102.
 - [9] Bykov DA, Doskolovich LL, Golovastikov NV, Soifer VA. Time-domain differentiation of optical pulses in reflection and in transmission using the same resonant grating. *J Opt* 2013; 15(10): 105703. DOI: 10.1088/2040-8978/15/10/105703.
 - [10] Golovastikov NV, Bykov DA, Doskolovich LL. Resonant diffraction gratings for spatial differentiation of optical beams. *Quantum Electronics* 2014; 44(10): 984-988. DOI: 10.1070/QE2014v044n10ABEH015477.
 - [11] Zhu T, Zhou Y, Lou Y, Ye H, Qiu M, Ruan Z, Fan S. Plasmonic computing of spatial differentiation. *Nat Commun* 2017; 8: 15391. DOI: 10.1038/ncomms15391.
 - [12] Ruan Z. Spatial mode control of surface plasmon polariton excitation with gain medium: from spatial differentiator to integrator. *Opt. Lett.* 2015; 40(4): 601-604.
 - [13] Golovastikov NV, Doskolovich LL, Bezus EA, Bykov DA, Soifer VA. An optical differentiator based on a three-layer structure with a W-shaped refractive index profile. *J Exp Theor Phys* 2018; 127(2): 202-209. DOI: 10.1134/S1063776118080174.
 - [14] Youssefi A, Zangeneh-Nejad F, Abdollahramezani S, Khavasi A. Analog computing by Brewster effect. *Opt Lett* 2016; 41(15): 3467-3470. DOI: 10.1364/OL.41.003467.
 - [15] Nesterenko DV, Kolesnikova MD, Lyubarskaya AV. Optical differentiation based on the Brewster effect.
-

-
- Computer Optics 2018; 42(5): 758-763. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-5-758-763.
- [16] Nesterenko DV, Lyubarskaya AV, Kolesnikova MD, Soifer VA. The dependence of the image edge detection directivity by Brewster effect on the gradient of inhomogeneities of objects. J Phys Conf Ser 2019; 1368: 022066. DOI: 10.1088/1742-6596/1368/2/022066.
- [17] Kolesnikova MD, Lyubarskaya AV, Nesterenko DV, Soifer VA. The resolution of optical image edge detection based on Brewster effect. J Phys Conf Ser 2019; 1368: 022016. DOI: 10.1088/1742-6596/1368/2/022016.
- [18] Nesterenko DV, Kolesnikova MD, Lyubarskaya AV, Soifer VA. Brewster effect in the broadband light reflectivity. J Phys Conf Ser 2020; 1461: 012116. DOI: 10.1088/1742-6596/1461/1/012116.
- [19] Pors A, Nielsen MG, Bozhevolnyi SI. Analog computing using reflective plasmonic metasurfaces. Nano Lett 2015; 15(1): 791-797.
- [20] Pors A, Bozhevolnyi SI. Plasmonic metasurfaces for efficient phase control in reflection. Opt Express 2013; 21(22): 27438-27451.
- [21] Chizari A, Abdollahramezani S, Jamali MV, Salehi JA. Analog optical computing based on a dielectric meta-reflect array. Opt Lett 2016; 41(15): 3451-3454.
- [22] Shu S, Li Z, Li YY. Triple-layer Fabry-Pérot absorber with near-perfect absorption in visible and near-infrared regime. Opt Express 2013; 21(21): 25307-25315.
- [23] Yan M. Metal-insulator-metal light absorber: a continuous structure. J Opt 2013; 15(2): 025006.
- [24] Cui Y, He Y, Jin Y, Ding F, Yang L, Ye Y, He S. Plasmonic and metamaterial structures as electromagnetic absorbers. Laser Photonics Rev 2014; 8(4): 495-520.
- [25] Ng C, Wesemann L, Panchenko E, Song J, Davis TJ, Roberts A, Gómez DE. Plasmonic Near - Complete Optical Absorption and Its Applications. Adv Opt Mater 2019; 7(14): 1801660.
- [26] Li Z, Butun S, Aydin K. Large-area, lithography-free super absorbers and color filters at visible frequencies using ultrathin metallic films. ACS Photonics 2015; 2(2): 183-188.
- [27] Wesemann L, Panchenko E, Singh K, Della Gaspera E, Gómez DE, Davis TJ, Roberts A. Selective near-perfect absorbing mirror as a spatial frequency filter for optical image processing. APL Photonics 2019; 4(10): 100801.
- [28] Nesterenko DV. Resonance characteristics of transmissive optical filters based on metal/dielectric/metal structures. Computer Optics 2020; 44(2): 219-228. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-681.
- [29] Nesterenko D, Hayashi S, Soifer V. Approximation of Fabry-Pérot resonances in Ag/quartz/Ag structures. 2020 International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT) 2020: 1-3. DOI: 10.1109/ITNT49337.2020.9253286.
-

Authors' information

Dmitry V. Nesterenko graduated with honors (1999) from Samara State Aerospace University (Samara, Russia), majoring in Physics. Candidate in Optics (2002). Currently he is a senior researcher at Diffractive Optics laboratory of the Image Processing Systems Institute RAS – Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS (Samara, Russia), an associate professor at Samara National Research University. His current research interests include nanophotonics, plasmonics, and electromagnetic theory. E-mail: nesterenko@smr.ru.

Andrey Andreevich Morozov (b. 1987). He received his master of Applied Mathematics and Physics (2010) in SSAU. Candidate in Physics and Mathematics (2014). He is researcher of Micro- and Nanotechnology laboratory at the Image Processing Systems Institute of RAS – Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS. He is co-author of 26 scientific papers. Research interests: diffractive optics, optical micromanipulation. E-mail: ragefalcon@mail.ru.

Leonid Leonidovich Doskolovich graduated with honors (1989) from S.P. Korolyov Kuibyshev Aviation Institute (presently, Samara National Research University), majoring in Applied Mathematics. He received his Doctor in Physics & Maths (2001) degree from Samara National Research University. Leading researcher of the IPSI RAS – Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, professor at Samara University's Technical Cybernetics subdepartment. Current research interests include diffractive optics, laser information technologies, nanophotonics. E-mail: leonid@ipsiras.ru.

Received December 22, 2020. The final version – May 25, 2021.
