

Дифференцирование оптических сигналов с помощью каскадных структур «металл-диэлектрик-металл»

Е. А. Безус^{1,2}, А. И. Кашапов^{1,2}, Д. А. Быков^{1,2}, Л. Л. Досколович^{1,2}

¹ Институт систем обработки изображений РАН — филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Самара, Россия

² Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва, Самара, Россия

Исследованы оптические свойства «каскадных» структур «металл-диэлектрик-металл» (МДМ-структур), состоящих из нескольких последовательно расположенных трехслойных МДМ-структур. Теоретически показано, что за счет «комбинирования» МДМ-структур, обладающих нулями отражения, можно получить нуль требуемого порядка в спектре отражения каскадной структуры. Наличие такого нуля по угловой или пространственной частоте позволяет использовать такие структуры в качестве оптических дифференциаторов, вычисляющих производные требуемого порядка от профиля падающего оптического сигнала по времени или пространственной координате. Представленные результаты численного моделирования подтверждают возможность применения каскадных МДМ-структур в качестве оптических дифференциаторов высокого порядка. Полученные результаты могут найти применение в системах аналоговых оптических вычислений и оптической обработки информации.

Ключевые слова: Нанопотоника, Дифференцирование оптических сигналов, Структуры «металл-диэлектрик-металл», Матрица рассеяния.

Цитирование: Безус, Е. А. Дифференцирование оптических сигналов с помощью каскадных структур «металл-диэлектрик-металл» / Е. А. Безус, А. И. Кашапов, Д. А. Быков, Л. Л. Досколович // НОЛОЕХРО 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 266–270.

В последние годы наблюдается всплеск интереса к разработке компактных структур фотоники для дифференцирования оптических сигналов, а также для реализации более сложных дифференциальных операторов. Указанные дифференцирующие структуры рассматриваются в качестве перспективной элементной базы для новых электронно-оптических устройств обработки информации [1]. В рамках линейной оптики преобразование оптического сигнала, происходящее при его взаимодействии с дифракционной структурой, может быть описано в рамках теории линейных систем [2, 3]. Передаточная функция (ПФ) дифракционной структуры пропорциональна коэффициенту отражения или пропускания структуры, рассматриваемому как функция угловой или пространственной частоты. Поскольку ПФ идеального дифференциатора, обеспечивающего вычисление n -ой производной, имеет нуль n -го порядка на центральной частоте, то необходимым условием для оптического вычисления производной n -го порядка является наличие нуля n -го порядка в спектре отражения или пропускания дифракционной структуры. Поскольку нули в спектре отражения (пропускания), как правило, обусловлены

резонансными эффектами возбуждения собственных мод структуры, для оптической реализации операций дифференцирования широко используются резонансные структуры.

Задача получения в спектре дифракционной структуры нуля порядка $n > 1$ является весьма сложной, и, как правило, требует использования структур, «поддерживающих» несколько резонансов на близких частотах. Базовый подход к получению нуля заданного порядка состоит в использовании т. н. композитных (или каскадных) структур, состоящих из нескольких последовательно расположенных резонансных дифракционных структур. В недавней статье [4] авторов настоящей работы было показано, что простая структура «металл-диэлектрик-металл» (МДМ-структура), состоящая из верхнего металлического слоя, диэлектрического слоя и металлической подложки (оптически непрозрачного металлического слоя), позволяет с высоким качеством реализовать вычисление первой производной по пространственной переменной и во времени. При этом было строго показано, что при заданных материалах, длине волны и угле падения излучения всегда можно получить нуль отражения за счет выбора толщин металлического и диэлектрического слоев МДМ-структуры. В настоящей работе рассмотрены каскадные МДМ-структуры, состоящие из нескольких МДМ-структур. Теоретически и численно показано, что последовательно «объединяя» МДМ-структуры, имеющие нуль отражения, можно получить в спектре отражения каскадной МДМ-структуры нуль заданного порядка. Данный результат обосновывает возможность использования композитных МДМ-структур для оптического вычисления производных заданного порядка. Представленные ниже результаты численного моделирования показывают, что рассматриваемые МДМ-структуры позволяют с высоким качеством реализовать вычисление высших производных профиля падающего оптического сигнала.

Для проведения теоретического анализа воспользуемся формализмом матрицы рассеяния. В общем случае матрица рассеяния слоистой структуры связывает комплексные амплитуды плоских волн i_u и i_d , падающих на структуру сверху и снизу, с комплексными амплитудами отраженной и прошедшей волн R и T :

$$\begin{bmatrix} T \\ R \end{bmatrix} = \mathbf{S} \begin{bmatrix} i_u \\ i_d \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} t & r_D \\ r_U & t \end{pmatrix} \begin{bmatrix} i_u \\ i_d \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где r_U и r_D – комплексные коэффициенты отражения структуры для плоских волн, падающих на структуру сверху и снизу соответственно, t – комплексный коэффициент пропускания структуры. Элементы матрицы рассеяния являются функциями угловой частоты ω и тангенциальной компоненты волнового вектора $k_{x,0}$ падающих волн. Матрица рассеяния композитной структуры, состоящей из двух структур, описываемых матрицами рассеяния \mathbf{S}_1 , \mathbf{S}_2 и разделенных диэлектрическим слоем с толщиной h и диэлектрической проницаемостью ε_d , может быть выражена в виде $\mathbf{S}_c = \mathbf{S}_1 \otimes \mathbf{L} \otimes \mathbf{S}_2$, где символ \otimes обозначает т. н. матричное произведение Редхеффера [5], а матрица \mathbf{L} представляет собой матрицу

рассеяния диэлектрического слоя и имеет вид $\mathbf{L} = \exp(i\psi)\mathbf{I}$. В последнем выражении \mathbf{I} – единичная матрица, $\psi = \sqrt{k_0^2 \varepsilon_d - k_{x,0}^2} h$ – фазовый набег, приобретаемый плоской волной при прохождении через диэлектрический слой, $k_0 = \omega/c$, c – скорость света в свободном пространстве.

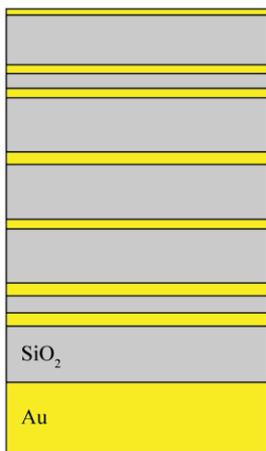
Предположим, что имеются две каскадные МДМ-структуры, обладающие нулями отражения n -го порядка по частоте на некоторой угловой частоте ω_0 для волн, падающих на структуру сверху. Матрицы рассеяния \mathbf{S}_i , $i = 1, 2$ таких структур можно представить в виде

$$\mathbf{S}_i = \begin{pmatrix} t_{i,0} + t_{i,1}(\omega - \omega_0) + O[(\omega - \omega_0)^2] & r_{iD,0} + r_{iD,1}(\omega - \omega_0) + O[(\omega - \omega_0)^2] \\ r_{iU,n}(\omega - \omega_0)^n + r_{iU,n+1}(\omega - \omega_0)^{n+1} + O[(\omega - \omega_0)^{n+2}] & t_{i,0} + t_{i,1}(\omega - \omega_0) + O[(\omega - \omega_0)^2] \end{pmatrix}. \quad (2)$$

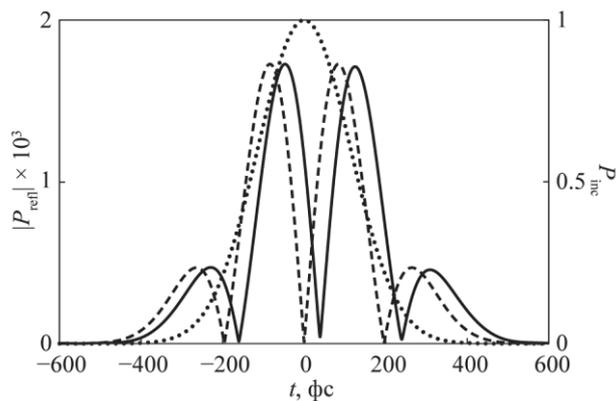
Применяя матричное произведение Редхеффера [5] к матрицам рассеяния \mathbf{S}_1 , \mathbf{L} и \mathbf{S}_2 (матрицы \mathbf{S}_1 , \mathbf{S}_2 определяются выражением (2)), можно показать, что каскадная МДМ-структура, составленная из двух указанных структур с нулями отражения n -го порядка, будет обладать нулем отражения $(n + 1)$ -го порядка при выполнении условия $\exp(2ik_{z,0}h)r_{2U,n} = -r_{1U,n}/t_{1,0}^2$. Аналогично анализу, проведенному в работе [4], можно показать, что при фиксированных параметрах нижней структуры с нулем n -го порядка указанное условие может быть выполнено за счет выбора толщины нижнего металлического слоя верхней структуры с нулем n -го порядка (которая однозначно определяет ее остальные геометрические параметры) и толщины разделяющего диэлектрического слоя.

Таким образом, начиная с «одиночных» (трехслойных) МДМ-структур, имеющих нули отражения первого порядка, и последовательно комбинируя их, можно получить структуру, обладающую нулем произвольного заданного порядка по угловой частоте. Следует отметить, что практически идентичные рассуждения позволяют построить каскадную МДМ-структуру с нулем заданного порядка по тангенциальной компоненте волнового вектора падающей волны (пространственной частоте).

Как было отмечено выше, наличие нуля n -го порядка по угловой или пространственной частоте позволяет использовать соответствующую структуру для оптического вычисления n -й производной по времени огибающей падающего оптического импульса или n -й производной по пространственной координате профиля падающего оптического пучка. Продемонстрируем это на примере временного дифференцирования с помощью каскадной МДМ-структуры, имеющей нуль отражения третьего порядка и, следовательно, позволяющей вычислять третью производную от огибающей падающего импульса. Структура была рассчитана для нормального падения ТЕ-поляризованного электромагнитного импульса с центральной длиной волны в свободном пространстве 630 нм и состоит из чередующихся слоев золота (Au) и диоксида кремния (SiO₂) (геометрия структуры схематично показана на рис. 1а). Толщины слоев структуры (перечислены сверху вниз) равны 16,9, 139,5, 24,8, 41,5, 26,1, 151,4, 35,1, 153,8, 26,4, 151,7, 35,8, 47,7, 37, 157,4, 200 нм.



а) Геометрия каскадной МДМ-структуры, имеющей нуль отражения третьего порядка по угловой частоте



б) Пример оптического вычисления производной по времени третьего порядка с помощью рассматриваемой каскадной МДМ-структуры: огибающая падающего гауссова импульса (точечная линия, правая вертикальная ось), абсолютная величина огибающей отраженного импульса (сплошная линия, левая вертикальная ось) и абсолютная величина аналитически вычисленной производной (пунктирная линия, левая вертикальная ось)

Рис. 1. Геометрия композитной МДМ-структуры, имеющей нуль отражения третьего порядка, (а) и пример оптического вычисления производной третьего порядка по времени (б)

На рис. 1б показан пример оптического вычисления производной третьего порядка по времени (сплошная линия, левая вертикальная ось) от огибающей падающего гауссова импульса (точечная линия, правая вертикальная ось). Для сравнения также показана аналитически вычисленная производная (пунктирная линия, левая вертикальная ось). Нормированное среднеквадратическое отклонение оптически вычисленной производной от аналитически рассчитанной (вычисленное без учета временного сдвига отраженного импульса, которое можно интерпретировать как время выполнения операции дифференцирования) составило лишь 1.55%, что говорит о высоком качестве дифференцирования.

Благодарность

Работа была выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 19-19-00514).

Список источников

- [1] **Zhou, Y.** Flat optics for image differentiation / Y. Zhou, H. Zheng, I. I. Kravchenko, J. Valentine // Nature Photonics. — 2020. — Vol. 14. — P. 316–323.
- [2] **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. — P. 3509–3511.

- [3] **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. — P. 1278–1281.
- [4] **Kashapov, A. I.** Spatial differentiation of optical beams using a resonant metal-dielectric-metal structure / A. I. Kashapov, L. L. Doskolovich, E. A. Bezus, D. A. Bykov, V. A. Soifer // *Journal of Optics*. — 2021. — Vol. 23. — 023501 (9pp).
- [5] **Li, L.** Formulation and comparison of two recursive matrix algorithms for modeling layered diffraction gratings / L. Li. // *Journal of the Optical Society of America A*. — 1996. — Vol. 13. — P. 1024–1035.

Differentiation of optical signals using cascaded metal-dielectric-metal structures

E. A. Bezus^{1,2}, A. I. Kashapov^{1,2}, D. A. Bykov^{1,2}, L. L. Doskolovich^{1,2}

¹ Image Processing Systems Institute of the RAS — Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” of the RAS, Samara, Russia

² Samara National Research University, Samara, Russia

We study optical properties of cascaded metal-dielectric-metal (MDM) structures constituted by several sequentially arranged three-layer MDM structures. We theoretically show that by “cascading” MDM structures having reflection zeros, one can obtain a zero of a required order in the reflection spectrum of the resulting structure. The presence of such a zero with respect to the angular or spatial frequency makes it possible to use such structures as optical differentiators computing derivatives of a required order of the profile of the incident optical signal with respect to time or a spatial variable. The presented numerical results confirm the possibility of the use of cascaded MDM structures as high-order optical differentiators. The obtained results may find application in analog optical computing and optical information processing systems.

Keywords: Nanophotonics, Differentiation of optical signals, Metal-dielectric-metal structures, Scattering matrix.