

## Оптический дифференциатор на основе трехслойной металлодиэлектрической структуры

А.И. Кашапов<sup>1,2</sup>, Л.Л. Досколович<sup>1,2</sup>, Д.А. Быков<sup>1,2</sup>, Е.А. Безус<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт систем обработки изображений РАН - филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Молодогвардейская 151, Самара, Россия, 443001

<sup>2</sup>Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34а, Самара, Россия, 443086

### Аннотация

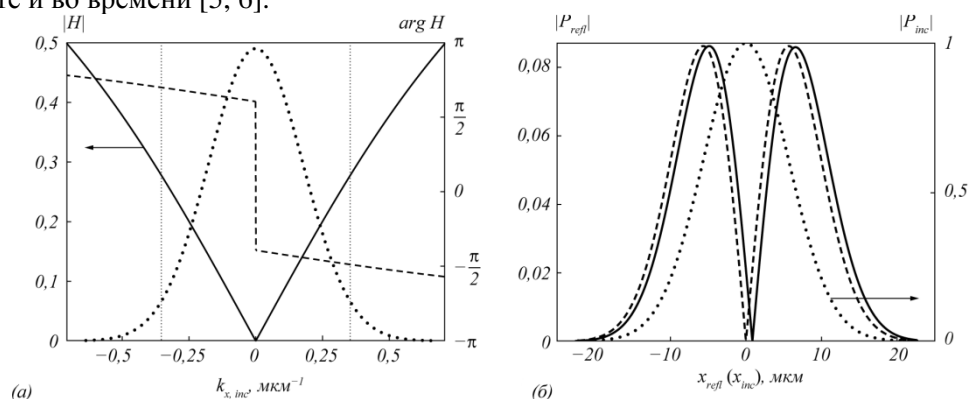
Получено, что коэффициент отражения резонансной структуры «металл-диэлектрик-металл» (МДМ), состоящей из верхнего металлического слоя, диэлектрического слоя и металлической подложки, может строго обращаться в нуль. Наличие нуля отражения позволяет использовать МДМ-структуру в качестве оптического дифференциатора. Приведенные результаты численного моделирования демонстрируют возможность оптического вычисления производной профиля падающего пучка по пространственной координате. Полученные результаты могут найти применение при создании систем аналоговых оптических вычислений и оптической обработки информации.

### Ключевые слова

Резонансная структура, металлодиэлектрическая система слоев, оптическое дифференцирование

Исследуемая в работе структура металл-диэлектрик-металл (МДМ-структура) состоит из верхнего металлического слоя, диэлектрического слоя и металлической подложки. Структуры такого типа широко используются в качестве абсорберов света [1-3]. Эффект поглощения света в МДМ-структуре имеет резонансную природу и обусловлен возбуждением мод структуры, локализованных в диэлектрическом слое.

С использованием модели многолучевой интерференции [4] можно строго показать, что при заданных материалах, длине волны и угле падения излучения всегда можно получить нулевое отражение за счет выбора толщин металлического и диэлектрического слоев МДМ-структуры. Этот результат является важным и, в частности, обосновывает возможность использования МДМ-структуры для дифференцирования оптических сигналов по пространственной координате и во времени [5, 6].



**Рисунок 1:** (а) Модуль (непрерывная линия) и фаза (пунктирная линия) пространственной ПФ МДМ-структуры при угле падения  $\theta = 30^\circ$  (геометрические и материальные параметры структуры приведены в тексте). Точечной линией показан спектр падающего пучка. (б) Модуль профиля отраженного сигнала (непрерывная линия) и аналитически рассчитанной производной (пунктирная линия) при монохроматическом падающем пучке с гауссовым профилем (точечная линия)

В качестве примера на рис. 1 (а) показаны модуль и фаза передаточной функции (ПФ) МДМ-структуры. ПФ рассчитана для МДМ-структуры, имеющей нулевое отражения при угле падения  $\theta = 30^\circ$  для случая падающей волны с ТЕ-поляризацией и длиной волны  $\lambda = 630$  нм. В данном случае в качестве материала металлического слоя и подложки использовалось золото (показатель преломления  $n_{Au} = 0.18836 + 3.4034i$ ), а в качестве материала диэлектрического слоя — кварц ( $n = 1.46$ ). При указанных параметрах толщина верхней золотой пленки МДМ-структуры равняется 29.8 нм, а толщина слоя диэлектрика — 168 нм. Из рис. 1 (а) видно, что рассчитанная передаточная функция в окрестности нулевой пространственной частоты хорошо совпадает с ПФ идеального дифференциатора по пространственной переменной  $H_{id}(k_{x,inc}) = ik_{x,inc}$ . Точечной линией на рис. 1 (а) показан спектр падающего гауссовского пучка. Данный спектр по большей части лежит в интервале линейности ПФ. В этой связи следует ожидать хорошего качества дифференцирования, что демонстрирует рис. 1 (б). На данном рисунке представлены амплитуда падающего пучка, рассчитанная в рамках электромагнитной теории амплитуда отраженного пучка и аналитически вычисленная производная гауссовской функции. В данном примере (рис. 1(б)) среднеквадратическое отклонение (СКО) модуля профиля отраженного пучка от аналитической производной, нормированное на максимальную амплитуду отраженного пучка, составляет всего 0.6 %. Отметим, что при расчёте нормированного СКО сдвиг отраженного пучка не учитывался.

Таким образом, представленный пример демонстрирует возможность использования МДМ-структуры в качестве дифференциатора по пространственной координате. Помимо выполнения операций пространственного дифференцирования, МДМ-структура может быть использована для дифференцирования во времени, а также для одновременного дифференцирования пространственно-временных оптических импульсов во времени и по пространственной переменной. При нормальном падении данная структура способна реализовать операцию дифференцирования второго порядка по пространственной координате.

## Литература

- [1] Yan, M. Metal–insulator–metal light absorber: a continuous structure // *J. Opt.* – 2013. – Vol. 15. – P. 025006.
- [2] 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 Photonics Rev.* – 2014. – Vol. 8(4). – P. 495-520.
- [3] 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 // *Adv. Optical Mater.* – 2019. – Vol. 7. – P. 1801660.
- [4] Борн, М. Основы Оптики // М. Борн, Э. Вольф. – М., 1973. – 720 с.
- [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 // *Opt. Lett.* – 2014. – Vol. 39. – P. 1278-1281.
- [6] Golovastikov, N.V. Analytical description of 3D optical pulse diffraction by a phase-shifted Bragg grating / N.V. Golovastikov, D.A. Bykov, L.L. Doskolovich, V.A. Soifer // *Opt. Express.* – 2016. – Vol. 24. – P. 18828-18842.