

АНАЛОГОВЫЙ ДИФФЕРЕНЦИАТОР НА ОСНОВЕ SiO_2 И TiO_2

А.С. Мигель, С.В. Малый

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

E-mail: anton.migel.99@mail.ru, maly@bsu.by

Предложена модель аналогового дифференциатора на основе чередующихся слоев SiO_2 и TiO_2 . Операция дифференцирования выполняется при прохождении электромагнитной волны через структуру дифференциатора. Представлены результаты численного моделирования структуры, реализующей пространственное дифференцирование 2-го порядка функции одной переменной.

Ключевые слова: аналоговые вычисления; дифференциатор; слоистая структура; метаматериал.

ANALOG DIFFERENTIATOR BASED ON SiO_2 AND TiO_2

A.S. Migel, S.V. Maly

Belarusian State University, Minsk, Belarus

E-mail: anton.migel.99@mail.ru, maly@bsu.by

A model of an analog differentiator based on alternating layers of SiO_2 and TiO_2 is proposed. The differentiation operation is performed when an electromagnetic wave transmits through the differentiator structure. The results of numerical simulation of the structure realizing spatial differentiation of the 2nd order of a function of one variable are presented.

Keywords: analog computing; differentiator; layered structure; metamaterial.

Введение

Оптические устройства, осуществляющие заданные математические преобразования оптических сигналов, представляют большой интерес для широкого спектра приложений, включающих оптическую обработку информации и аналоговые оптические вычисления. Ключевыми особенностями таких устройств являются компактная и интегрируемая конфигурация, низкое энергопотребление и естественная способность к параллельным вычислениям.

В работе [1] было предложено два подхода к использованию метаматериалов для выполнения пространственных преобразований оптических сигналов. Первый подход состоял в использовании структуры, состоящей

из слоев с градиентным изменением показателя преломления и метаповерхности. Второй подход состоял в использовании многослойной структуры, рассчитанной непосредственно из условия формирования заданного пространственного преобразования входного сигнала.

Одной из базовых операций аналоговой обработки оптических сигналов является операция дифференцирования по пространственной координате. Для осуществления операций дифференцирования были предложены различные структуры реализующие данные подходы: первый подход – компактные аналоги коррелятора с градиентными линзами и метаповерхностью [2–4]; второй – различные резонансные структуры, включая брэгговские решетки [5], дифракционные решетки [6, 7], плазмонные структуры на основе схемы Кречмана [8, 9], микро- и нанорезонаторы [10,11].

Более перспективным является второй подход, в рамках которого структура непосредственно реализует заданное пространственное преобразование входного сигнала, значительно компактнее, поскольку не требуют дополнительных линз, выполняющих преобразование Фурье и значительно проще в изготовлении по сравнению с метаповерхностями.

Рассмотрена модель аналогового устройства, способного выполнять дифференцирование второго порядка по пространственной координате.

Описание дифференциатора

Схематическое изображение исследуемого дифференциатора представлено на рисунке 1 а). Ключевой особенностью данного устройства является независимость выбора стороны функционирования (рисунок 1 б)).

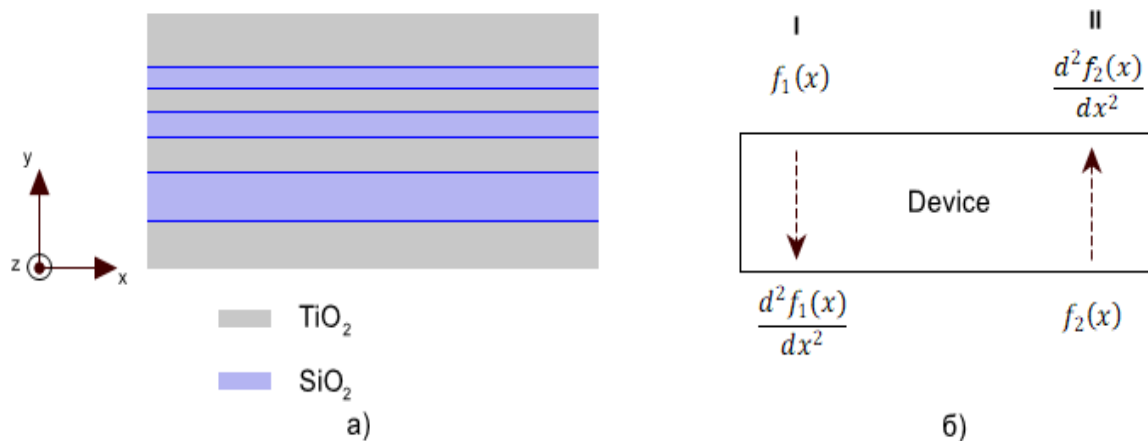


Рисунок 1 – Дифференциатор 2-го порядка: а) схематическое изображение структуры, реализующей дифференцирование 2-го порядка по пространственной координате; б) схемы функционирования дифференциатора.

За основу исследуемого дифференциатора была взята структура, представленная в работе [12] и состоящая из 12 слоев. Для уменьшения количества слоев была оптимизирована толщина некоторых из них. Таким образом, исследуемый дифференциатор состоял из 7 чередующихся слоев SiO_2 и TiO_2 , со следующими параметрами $n_1 = 1,457$ (SiO_2) и $n_2 = 2,2813$ (TiO_2) для длины волны $\lambda = 632,8$ нм [13]. Толщина каждого слоя дифференциатора представлена в таблице.

Таблица – Параметры дифференциатора

№ слоя	1	2	3	4	5	6	7
Материал	TiO_2	SiO_2	TiO_2	SiO_2	TiO_2	SiO_2	TiO_2
d, нм	346,4	113,5	134,2	139,4	196,4	275,7	299,7

Результаты численного моделирования

Численное моделирование модели дифференциатора проводилось с использованием метода конечных элементов на длине волны $\lambda = 632,8$ нм.

Операция дифференцирования 2-го порядка проводилась над следующими функциональными зависимостями E_z компоненты электрического поля падающей волны:

$$E_z(x) = 3 \left(\frac{x}{\lambda} \right)^2 \exp \left(- \left(\frac{x}{\lambda} \right)^2 \right), \quad (1)$$

$$E_z(x) = 4 \left(\frac{x}{\lambda} \right)^3 \exp \left(- \left(\frac{x}{\lambda} \right)^2 \right), \quad (2)$$

$$E_z(x) = \frac{x}{\lambda} \exp \left(- \left(\frac{x}{\lambda} \right)^2 \right), \quad (3)$$

где λ – длина волны.

Пример выполнения операции дифференцирования 2-го порядка над E_z компонентой электрического поля падающей волны, изменяющейся по закону (1), представлен на рисунке 2.

Пример выполнения операции дифференцирования 2-го порядка над E_z компонентой электрического поля падающей волны, изменяющейся по закону (2), представлен на рисунке 3.

На рисунке 4 а) показана зависимость E_z компоненты электрического поля падающей волны, изменяющейся по закону (3), а на рисунке 4 б) показаны результаты дифференцирования данной компоненты для двух схем функционирования и аналитический расчет.

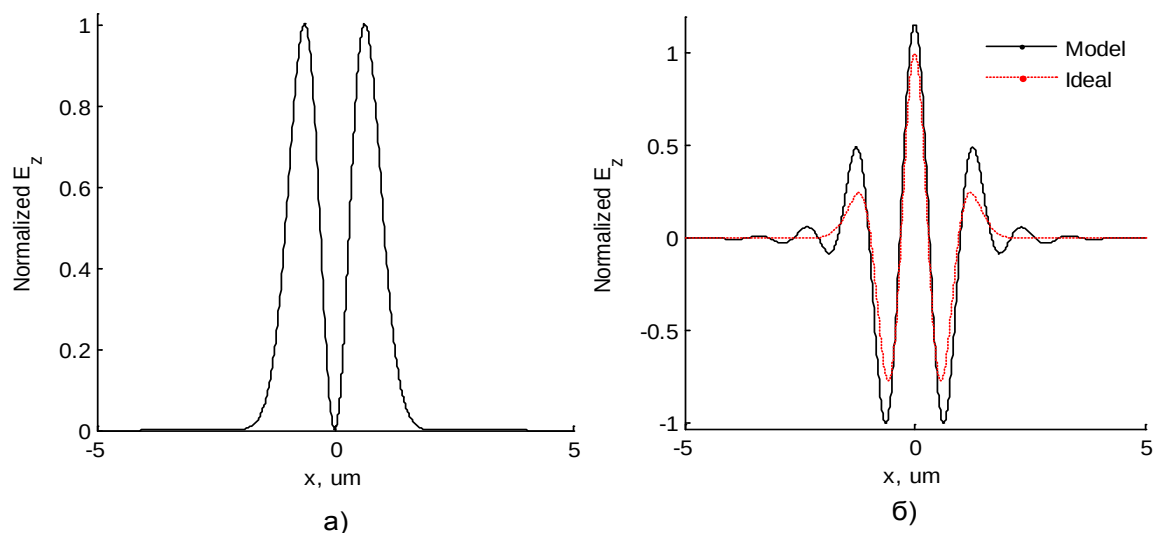


Рисунок 2 – Дифференцирование 2-го порядка: а) зависимость E_z компоненты электрического поля падающей волны, изменяющейся по закону (1); б) сравнительный график результатов моделирования и аналитического расчета.

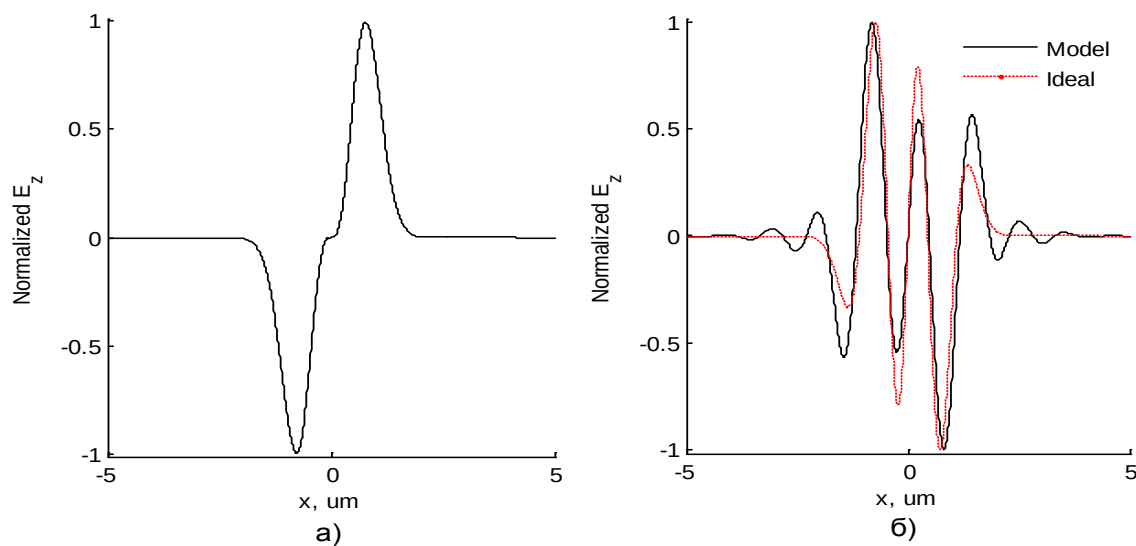


Рисунок 3 – Дифференцирование 2-го порядка: а) зависимость E_z компоненты электрического поля падающей волны, изменяющейся по закону (2); б) сравнительный график результатов моделирования и аналитического расчета.

Среднеквадратическая ошибка между полученными результатами и аналитическим расчетом не превысила 0,013.

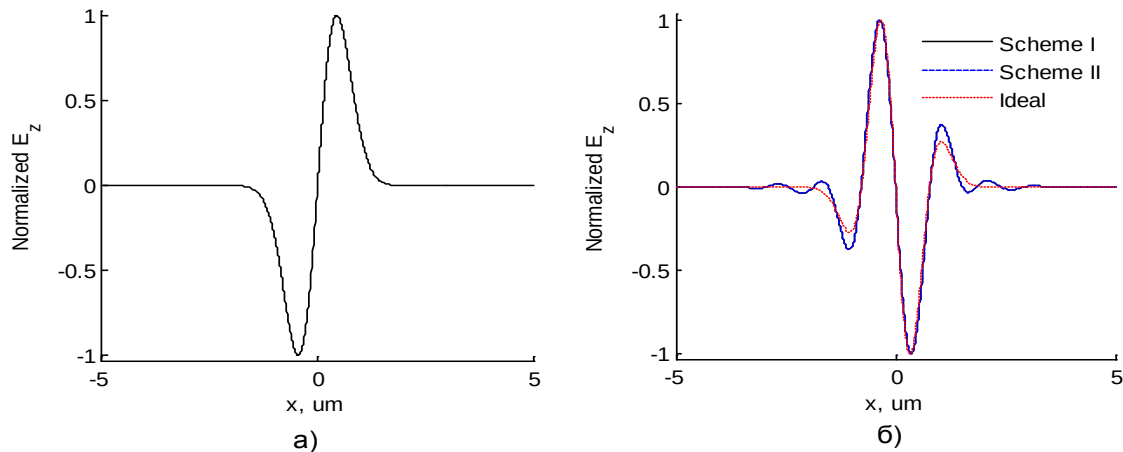


Рисунок 4 – Дифференцирование 2-го порядка: а) зависимость E_z компоненты электрического поля падающей волны, изменяющейся по закону (3); б) сравнительный график результатов моделирования и аналитического расчета.

Заключение

Предложена модель оптического дифференциатора на основе SiO_2 и TiO_2 , работающего в режиме прохождения. Результаты численного моделирования демонстрируют возможность выполнения дифференцирования 2-го порядка по пространственной координате с приемлемой точностью. Важной особенностью данного дифференциатора является инвариантность относительно направления распространения волны, что позволяет проводить как последовательные, так и параллельные вычисления. Полученные результаты могут найти применение при разработке систем аналоговых оптических вычислений.

Библиографические ссылки

1. Silva A., Monticone F., Castaldi G. et al. Performing Mathematical Operations with Metamaterials // Science. 2014. V. 343. P.160–163.
2. Pors A., Nielsen M.G., Bozhevolnyi S.I. Analog Computing Using Reflective Plasmonic Metasurfaces // Nano Lett. 2015. V. 15. P. 791–797.
3. Chizari A., Abdollahramezani S., Jamali M.V. et al. Analog optical computing based on a dielectric meta-reflect array // Opt. Lett. 2016. V. 41. P. 3451–3454.
4. AbdollahRamezani S., Arik K., Khavasi A., et al. Analog computing using graphene-based metalines // Opt. Lett. 2015. V.40. P. 5239–5242.
5. Bykov, D. A., Doskolovich, L. L., Bezus, E. A. & Soifer, V. A. Optical computation of the Laplace operator using phase-shifted Bragg grating // Opt. Express 2014. V. 22 P. 25084–25092.

6. Bykov D.A., Doskolovich L.L., Morozov, A.A., et al. First-order optical spatial differentiator based on a guided-mode resonant grating // Opt. Express 2018, V. 26, P. 10997–11006.
7. Rajabalipanah H., Momeni A., Rahmanzadeh M. et al. Parallel wave-based analog computing using metagratings // Nanophotonics. 2022. V. 11. P. 1561-1571
8. Zhu T., Zhou Y., Lou Y. et al. Plasmonic computing of spatial differentiation // Nat. Commun. 2017. V. 8.
9. Zhang W., Zhang X. Backscattering-Immune Computing of Spatial Differentiation by Nonreciprocal Plasmonics // Phys. Rev. Appl. 2019 V. 11.
10. Guo C., Xiao M., Minkov M., Shi Y., et al. Photonic crystal slab Laplace operator for image differentiation // Optica. 2018 V. 5. P. 251–256.
11. Zhou Y., Wu W., Chen R., et al. Analog Optical Spatial Differentiators Based on Dielectric Metasurfaces // Adv. Opt. Mater. 2020. V. 8.
12. Zhou Y., Zhan J., Chen R., et al. Analogue Optical Spatiotemporal Differentiator // Adv. Optical Mater. 2021. V.9.
13. Refractive index database. URL: <https://refractiveindex.info/> (дата обращения: 08.08.2022.)