

Оптическое вычисление оператора Лапласа с помощью слоистых металлодиэлектрических структур

А.И. Кашапов

Институт систем обработки изображений, НИЦ

«Курчатовский институт»;

Самарский национальный исследовательский университет
им. академика С.П. Королева

Самара, Россия

ar.kashapov@gmail.com

Е.А. Безус

Институт систем обработки изображений, НИЦ

«Курчатовский институт»;

Самарский национальный исследовательский университет
им. академика С.П. Королева

Самара, Россия

evgeni.bezus@gmail.com

Аннотация — Теоретически и численно исследована оптическая реализация операции пространственного дифференцирования второго порядка с помощью слоистой металлодиэлектрической структуры при наклонном падении светового пучка. Показано, что при отражении от рассматриваемой структуры происходит преобразование профиля падающего пучка, соответствующее вычислению оператора Лапласа по пространственным координатам. Результаты численного моделирования подтверждают теоретические результаты и, в частности, показывают возможность оптического вычисления оператора Лапласа с высоким качеством.

Ключевые слова — оптическое дифференцирование, вторая производная, оператор Лапласа, слоистая структура

I. ВВЕДЕНИЕ

Возможность оптического вычисления оператора Лапласа представляет большой интерес для задач оптической обработки информации, и, в особенности, задач анализа и обработки изображений [1, 2]. В частности, оператор Лапласа может быть применен для выявления изменений яркости или контраста в изображениях. Он позволяет обнаружить контуры объектов, точки пересечения линий и другие важные детали, что может повысить точность классификации изображений [3].

В настоящей работе исследуется слоистая металлодиэлектрическая структура, состоящая из семи чередующихся слоёв металла и диэлектрика. Показано, что такая структура позволяет выполнять оптическое вычисление оператора Лапласа от профиля падающего оптического пучка с высокой точностью. Высокая скорость и эффективность оптических методов делает их важными в таких областях, как медицинская диагностика, машинное зрение, анализ изображений в научных и промышленных приложениях, а также в робототехнике.

II. ГЕОМЕТРИЯ ИССЛЕДУЕМОЙ СТРУКТУРЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Геометрия предлагаемой структуры представлена на рис. 1. Структура состоит из семи чередующихся

Л.Л. Досколович

Институт систем обработки изображений, НИЦ

«Курчатовский институт»;

Самарский национальный исследовательский университет
им. академика С.П. Королева

Самара, Россия

leonid@ipsiras.ru

Д.А. Быков

Институт систем обработки изображений, НИЦ

«Курчатовский институт»;

Самарский национальный исследовательский университет
им. академика С.П. Королева

Самара, Россия

bycovd@gmail.com

металлических и диэлектрических слоёв (материалы отмечены цветами на рис. 1), расположенных на подложке из кварца (SiO_2), над структурой — воздух.

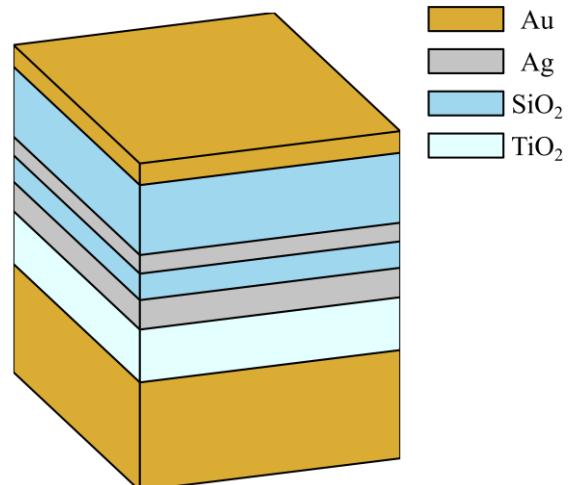


Рис. 1. Геометрия исследуемой структуры для оптического вычисления оператора Лапласа

Толщины слоёв рассматриваемой структуры были рассчитаны с использованием теоретических формул, полученных в работе [2] для обеспечения преобразования пучка, показанного на рис. 2. Толщины слоёв, перечисленные сверху-вниз, описываются следующим набором значений: [10,0; 132,3; 8,6; 52,2; 33,6; 74,4; 105,0] нм. Рабочая длина волны составляет 630 нм, а пучок падает на структуру под углом 36 градусов.

В качестве примера применения исследуемой структуры для оптического вычисления оператора Лапласа был рассмотрен падающий пучок с профилем в виде отпечатка пальца при минимальной толщине линий 4 мкм (рис. 2а). Для расчета профиля отраженного пучка использовался метод строгого решения задачи дифракции на слоистых структурах [4]. Нормированное среднеквадратичное отклонение профиля отраженного пучка (рис. 2б) от аналитически вычисленного оператора Лапласа не превышает 1%.

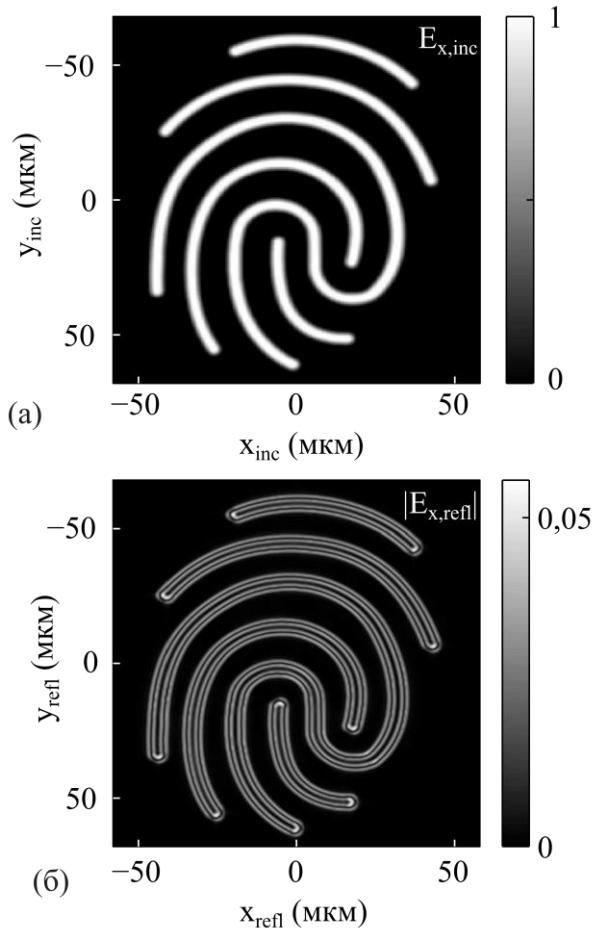


Рис. 2. Профиль E_x -компоненты падающего пучка (а), имеющего вид отпечатка пальца, и отраженного пучка (б), содержащего результат оптического вычисления оператора Лапласа

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показана возможность эффективного оптического вычисления оператора Лапласа с помощью простой слоистой структуры, состоящей из семи чередующихся слоев металла и диэлектрика. Приведенные результаты численного моделирования в рамках строгой электромагнитной теории дифракции демонстрируют возможность оптического вычисления оператора Лапласа с высоким качеством (нормированная среднеквадратическая ошибка не превышает 1%). Полученные результаты могут найти применение при создании систем аналоговых оптических вычислений и оптической обработки информации.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

ЛИТЕРАТУРА

- [1] 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 // Opt. Express – 2014. – Vol. 22(21). – P. 25084-25092.
- [2] Doskolovich, L.L. Optical computation of the Laplace operator at oblique incidence using a multilayer metal-dielectric structure / L.L. Doskolovich, A.I. Kashapov, E.A. Bezus, N.V. Golovastikov, D.A. Bykov // Opt. Express – 2023. – Vol. 31(10). – P. 17050-17064.
- [3] Soshnikov, D.V. Gradient method for designing cascaded DOEs and its application in the problem of classifying handwritten digits / D.V. Soshnikov, L.L. Doskolovich, E.V. Byzov // Comp. Opt. – 2023. – Vol. 47(5). – P. 691-701.
- [4] Moharam, M.G. Stable implementation of the rigorous coupled wave analysis for surface-relief gratings: Enhanced transmittance matrix approach / M.G. Moharam, D.A. Pommet, E.B. Grann, T.K. Gaylord // J. Opt. Soc. Am. A – 1995. – Vol. 12. – P. 1077-1086.