УДК 535.4

МЕТОД РАСЧЁТА МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУР

А.И. Кашапов[1,2], Е.А. Безус[1,2], Д.А. Быков[1,2], Л.Л. Досколович[1,2]

[1]Институт систем обработки изображений, НИЦ «Курчатовский институт», г. Самара
[2]Самарский университет, г. Самара
e-mail: ar.kashapov@gmail.com

Аннотация

Предложен полуаналитический метод расчёта мультиспектральных металлодиэлектрических структур, основанный на обобщении подхода расчёта трёхслойных структур «металл–диэлектрик–металл» на многослойные системы. В качестве примера рассмотрена пятислойная металлодиэлектрическая структура, в спектре отражения которой формируются два нуля. Представленные результаты демонстрируют возможность расчёта слоистых металлодиэлектрических структур, обеспечивающих формирование нескольких нулей отражения на заданных длинах волн, и могут быть использованы при разработке оптических фильтров и устройств обработки оптических сигналов.

Ключевые слова: металлодиэлектрическая структура, нуль отражения, многослойная система, спектр отражения, оптический фильтр.

Введение

В последние годы наблюдается интерес к разработке структур фотоники с заданными спектральными характеристиками на нескольких длинах волн [1, 2]. Такие структуры находят применение в задачах фильтрации, сенсорики и обработки оптических сигналов. Одним из ключевых направлений является создание компактных слоистых структур, обеспечивающих формирование нескольких нулей отражения на заданных длинах волн.

В данной работе предложен полуаналитический метод расчёта мультиспектральных металлодиэлектрических структур, в спектре отражения которых формируется несколько нулей. Приведённые результаты демонстрируют возможность синтеза мультиспектральных структур с заданными характеристиками и могут быть использованы при разработке оптических фильтров и функциональных фотонных устройств.

1. Описание метода

В работе [3] представлен алгоритм расчёта трёхслойных структур «металл–диэлектрик–металл» (МДМ-структур), позволяющий определять толщины слоёв, обеспечивающие нуль отражения при заданных длине волны λ и угле падения θ. Рассматриваемая структура задаётся толщинами слоёв d_1, d_2, d_3, при этом комплексный

коэффициент отражения структуры может быть записан в виде $r(\lambda, \theta, d_1, d_2, d_3)$. Условие формирования нуля отражения записывается как

$$r(\lambda, \theta, d_1, d_2, d_3) = 0, \quad (1)$$

что эквивалентно выполнению условий равенства нулю модуля и аргумента коэффициента отражения:

$$|r| = 0, \arg(r) = 0. \quad (2)$$

Решение данной системы уравнений при фиксированной толщине нижнего металлического слоя d_3 позволяет последовательно определить толщины верхнего металлического и диэлектрического слоёв [3].

Обобщение данного подхода на многослойные структуры иллюстрируется на рис. 1. Нижний металлический слой заменяется дополнительной МДМ-структурой, в результате чего формируется пятислойная структура металл–диэлектрик–металл–диэлектрик–металл.

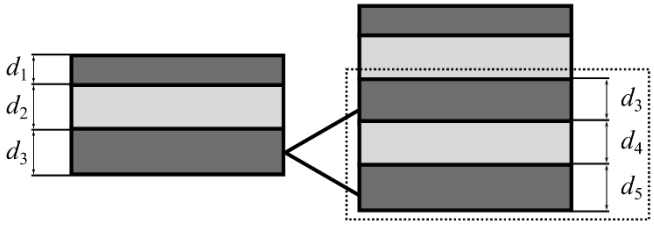

Рисунок 1 – Схематичное изображение трёхслойной МДМ-структуры и её обобщение на пятислойную структуру

Пятислойная структура может быть представлена как совокупность двух взаимосвязанных МДМ-подструктур. Верхняя подструктура включает верхний металлический слой d_1, диэлектрический слой d_2 и нижнюю часть структуры, рассматриваемую как эффективный «подслой». Нижняя подструктура, в свою очередь, включает нижний металлический слой d_5, диэлектрический слой d_4 и верхнюю часть структуры как эффективный «надслой». Коэффициент отражения структуры имеет вид

$$r(\lambda, \theta, d_1, d_2, d_3, d_4, d_5). \quad (3)$$

Требование формирования нулей отражения на заданных длинах волн λ_1 и λ_2 приводит к системе уравнений

$$\begin{cases} r\left(\lambda_1, \theta, d_1, d_2, d_3, d_4, d_5\right) = 0, \\ r\left(\lambda_2, \theta, d_1, d_2, d_3, d_4, d_5\right) = 0, \end{cases} \quad (4)$$

что эквивалентно системе из четырёх уравнений относительно толщин слоёв d_1, d_2, d_3, d_4.

Таким образом, задача синтеза мультиспектральной структуры сводится к решению системы нелинейных уравнений относительно толщин слоёв. Предложенный подход может быть обобщён на случай произвольного числа нулей отражения за счёт увеличения числа слоёв структуры.

2. Пример расчёта мультиспектральной структуры

В качестве примера была рассчитана пятислойная металлодиэлектрическая структура, обеспечивающая формирование двух нулей в спектре отражения. В качестве металлических слоёв использовалось золото (Au), в качестве диэлектрических слоёв и подложки – диоксид кремния (SiO_2), среда над структурой – воздух. Расчёт выполнялся для угла падения $\theta = 30°$ и двух заданных длин волн $\lambda_1 = 550$ нм и $\lambda_1 = 650$ нм. В результате решения системы уравнений (3) были получены толщины слоёв: $d_1 = 22{,}3$ нм; $d_2 = 139{,}0$ нм; $d_3 = 26{,}4$ нм; $d_4 = 145{,}1$ нм; $d_5 = 200{,}0$ нм. Спектр отражения рассчитанной структуры показан на рис. 2.

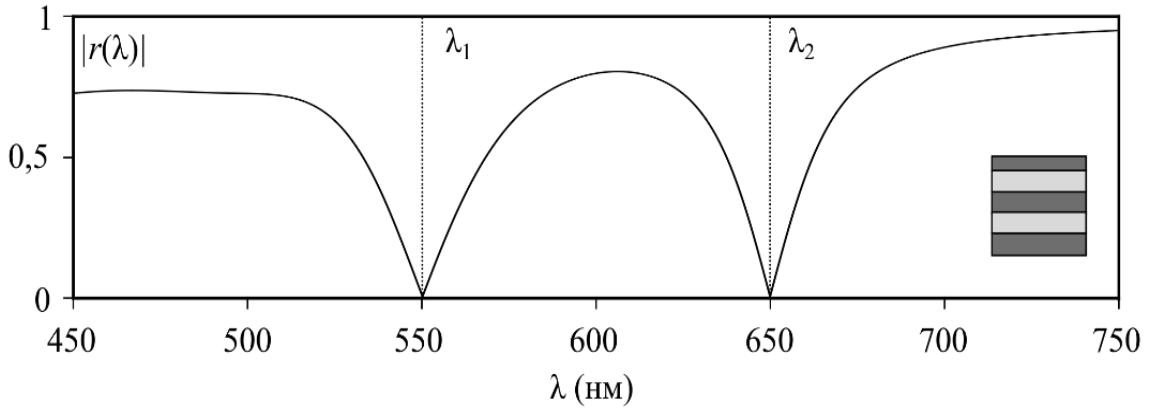

Рисунок 2 – Спектр отражения пятислойной структуры Au–SiO_2–Au–SiO_2–Au при угле падения $\theta = 30°$. Вертикальными линиями отмечены заданные длины волн λ_1 и λ_2, соответствующие нулям отражения.

Заключение

В настоящей работе предложен полуаналитический метод расчёта мультиспектральных металлодиэлектрических структур. В основе метода лежит обобщение подхода расчёта трёхслойных МДМ-структур на случай многослойных систем. Получены условия, позволяющие формировать несколько нулей отражения за счёт решения системы уравнений относительно толщин слоёв. В качестве примера рассчитана пятислойная металлодиэлектрическая структура, обеспечивающая два нуля отражения. Результаты расчёта подтверждают работоспособность предложенного метода и демонстрируют возможность его применения для синтеза мультиспектральных оптических фильтров, сенсоров и устройств обработки оптических сигналов.

Работа выполнена в рамках государственного задания на науку Самарскому университету (проект FSSS-2024-0016).

Список использованных источников

1. Lu, X. Metal-dielectric-metal based narrow band absorber for sensing applications / X. Lu, R. Wan, T. Zhang // Optics Express. – 2015. – V. 23, № 23. – P. 29842–29847.

2. Hybrid metal-graphene plasmonic sensor for multi-spectral sensing in both near- and mid-infrared ranges / Q. Hong, J. Luo, C. Wen [et al.] // Optics Express. – 2019. – V. 27, № 25. – P. 35914–35924.

3. Spatial differentiation of optical beams using a resonant metal-dielectric-metal structure / A. I. Kashapov, L. L. Doskolovich, E. A. Bezus [et al.] // Journal of Optics. – 2021. – V. 23, № 2. – P. 023501.

METHOD FOR THE DESIGN OF MULTISPECTRAL METAL–DIELECTRIC STRUCTURES

A.I. Kashapov[1,2], E.A. Bezus[1,2], D.A. Bykov[1,2], L.L. Doskolovich[1,2]

[1]Image Processing Systems Institute, NRC "Kurchatov Institute", Samara
[2]Samara University, Samara
e-mail: ar.kashapov@gmail.com

Abstract

An analytical method for the design of multispectral metal–dielectric structures is proposed, based on the generalization of the approach for calculating three-layer metal–dielectric–metal (MDM) structures to multilayer systems. As an example, a five-layer metal–dielectric structure is considered, in which two reflection zeros are formed in the reflection spectrum. The results demonstrate the possibility of designing layered metal–dielectric structures that provide multiple reflection zeros at prescribed spectral positions and can be used in the development of optical filters and optical signal processing devices.

Keywords: metal–dielectric structure, reflection zero, multilayer system, reflection spectrum, optical filter.