DOI: 10.17117/na.2015.11.04.257

Поступила (Received): 30.11.2015

<http://ucom.ru/doc/na.2015.11.04.257.pdf>

Головачева Е.В., Лерер А.М., Иванова И.Н. Применение метода приближенных граничных условий для расчета дифракции двумерной решетки в оптическом диапазоне

Golovacheva E.V., Lerer A.M., Ivanova I.N.
Application of approximate boundary conditions for the calculation
of the diffraction grating in a two-dimensional optical range

Задача о дифракции электромагнитных волн оптического диапазона на двумерной решетке из металлических полосок прямоугольной формы решена методом приближенных граничных условий (ПГУ) для тонкого диэлектрического слоя. Обоснована корректность применения метода ПГУ для получения основных физических закономерностей

Ключевые слова: наноструктура, дифракционная решётка, частотно-селективная поверхность, интегральное уравнение, сенсор, резонансное поглощение и отражение

The problem of diffraction of electromagnetic waves in the optical range on the two-dimensional lattice of metal strips rectangular solved by approximate boundary conditions (ABC) for a thin dielectric layer. Substantiates the validity of the method ABC for basic physical laws

Key words: nanostructure, diffraction grating, frequency selective surface, integral equation, sensor, resonant absorption and reflection

Головачева Елена Валерьевна

Кандидат физико-математических наук, доцент
Южный федеральный университет
г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 5

Golovacheva Elena Valerievna

Candidate of Physico-mathematical Sciences,
Associate Professor
Southern federal university
Rostov-on-Don, Zorge st., 5

Лерер Александр Михайлович

Доктор физико-математических наук, профессор
Южный федеральный университет
г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 5

Lerer Alexander Mikhailovich

Doctor of Physico-mathematical Sciences, Professor
Southern federal university
Rostov-on-Don, Zorge st., 5

Иванова Ирина Николаевна

Инженер
Южный федеральный университет
г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 5

Ivanova Irina Nikolaevna

Engineer
Southern federal university
Rostov-on-Don, Zorge st., 5

Работа выполнена при финансовой поддержки проектной части внутренних грантов ЮФУ 2014 – 2016 г.г., № 213.01.-07.2014/08ПЧВГ.

В оптическом диапазоне металл не является идеальным проводником, а имеет свойства плазмы твердого тела. Поэтому при решении задач дифракции

электромагнитных волн оптического диапазона на металлическом объекте необходимо учитывать поле внутри образца. Избежать процесса вычисления полей внутри диэлектрических и металлических пленок возможно при использовании метода приближённых граничных условий (ПГУ) для диэлектрического слоя [1]. В этом случае поле внутри пленки не рассматривается. Пленки считаются бесконечно тонкими, на них выполняются граничные условия импедансного типа. Хотя ПГУ введены для неограниченных по длине и ширине пленок, они широко используются для решения задач рассеяния на лентах (диэлектрических и металлических в оптическом диапазоне) [2]. Применение метода ПГУ всегда требует обоснования достоверности полученных результатов.

Цель работы – приближенным и строгим методами решить задачу дифракции электромагнитных волн на двумерной решетке из металлических полосок прямоугольной формы, оценить точность метода ПГУ.

Исследуемая структура – многослойная металлодиэлектрическая структура, содержащая двумерно периодические металлические пленки прямоугольной формы. Элементарная ячейка решетки может содержать несколько пленок (рис. 1).

**Рис. 1. Элементарная решетка
двумерно-периодической решетки**

Если рассматривать диэлектрическую полоску толщиной t , перпендикулярную оси z , то ПГУ имеют вид: $\vec{E}_{tg}^+ = \vec{E}_{tg}^-$, $\vec{H}_{tg}^+ - \vec{H}_{tg}^- = 2i \frac{k}{Z_0} \epsilon_s Q \vec{E}_{tg} [\vec{n}, \vec{E}_{tg}]$, где $Q = \frac{1}{\chi} \operatorname{tg} \frac{\chi t}{2}$, $\chi = k \sqrt{\epsilon_s}$. Символами « $\pm$ » обозначены компоненты поля, соответственно, сверху ($z = t$) и снизу ($z = 0$) полоски. Первые парные сумматорные уравнения получены относительно неизвестной плотности тока. Вторую пару получаем из условия равенства нулю тока вне полосок. Решение находится методом Галеркина, при этом токи на полосках выражаются через базисные функции – полинома Гегенбауэра и Лежандра. В результате получим систему линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных коэффициентов, решая которую получим неизвестные коэффициенты и распределение поля.

Строгий метод – решение объемных интегродифференциальных уравнений (ОИДУ) относительно напряженности электрического поля внутри металлических пленок. Этот метод описан в [3].

Численные результаты. Использование модифицированного импеданса Q и введение эффективной ширины и длины позволило получить высокую точ-

ность расчетов методом ПГУ (рис.2). Численные эксперименты показали справедливость этого утверждения даже для узких полосок, у которых толщина и ширина одного порядка.

Сплошные кривые на рис. 2 – коэффициент отражения R , штриховые – коэффициент прохождения T по мощности. Кривые с прямоугольными символами – результаты строгих расчетов методом ОИДУ, со звездочками – расчеты методом ПГУ с параметром Q и с использованием эффективной ширины и длины. На рис. 2-4 результаты при нормальном падении волны. Увеличение периодов решетки при неизменном размере полосок приводит к незначительному увеличению резонансной длины волны λ_r и увеличению добротности полуволнового резонанса (рис. 3).

Рис. 2. Резонансные кривые для решетки с толщиной серебряных полосок $t=15$ нм, $d_x = d_y=200$ нм, $l_x = l_y=150$ нм. Нормальное падение. Диелектрическая проницаемость подложки здесь и ниже 1.45

Рис. 3. Резонансные кривые для решетки при различных периодах решетки $d_x = d_y = d$. $t=25$ нм. Кривые 1, 2, 3 – $d=200, 250, 300$ нм, серебряные полоски. Кривая 4 – $d=200$, золотые полоски. $l_x = l_y=150$ нм

Так диэлектрическая проницаемость металлов в оптическом диапазоне для золота и серебра отличаются, то и резонансные кривые для серебряной и

золотой решетки различные (рис. 3). С уменьшением толщины металлических полосок увеличивается λ_r (рис. 3). Резонансы можно трактовать как резонансы поверхностной волны (поверхностного плазмон – поляритона), распространяющейся в отрезке волновода, образованного металлическим слоем на подложке. Коэффициент замедления такого волновода уменьшается с увеличением толщины металла t . Поэтому плазмонный резонанс наступает при меньших длинах волн.

Численные эксперименты показали, что резонансные кривые для квадратных полосок почти не меняются при повороте плоскости падения. Резонансные кривые существенно зависят от угла падения и поляризации волны.

Выводы. Применение метода ПГУ позволило на один – два порядка ускорить скорость расчетов. Введение эффективной ширины и длины позволило сблизить рассчитанные двумя методами значения резонансных длин волн, но при этом резонансная кривая, рассчитанная методом ПГУ, шире. При резонансе коэффициент прохождения близок к нулю, коэффициент отражения более 0,9, потери в металлических полосках менее 10% от падающей мощности. С увеличением толщины металлических полосок уменьшается резонансная длина волны. Увеличение периодов решетки при неизменном размере полосок приводит к незначительному увеличению резонансной длины волны и увеличению добротности полуволнового резонанса. Так диэлектрическая проницаемость металлов в оптическом диапазоне для золота и серебра отличаются, то и резонансные кривые для серебряной и золотой решетки различные.

Список используемых источников:

1. Вайнштейн Л.А. Теория дифракции и метод факторизации. М.: Сов. Радио, 1966. 428 с.
2. Zinenko T.L., Nosich A.I., Okuno Y. // IEEE Trans. Antennas and Propagation. 1998. V. 46. № 10. P. 1498.
3. Лерер А.М. Радиотехника и электроника. 2012. Т. 57. № 11. С. 1160-1169.

© 2015, Головачева Е.В., Лерер А.М., Иванова И.Н.
Применение метода приближенных граничных
условий для расчета дифракции двумерной
решетки в оптическом диапазоне

© 2015, Golovacheva E.V., Lerer A.M., Ivanova I.N.
Application of approximate boundary conditions for
the calculation of the diffraction grating in a two-
dimensional optical range