

УДК 535.421

Исследование спектральных характеристик и оптимизация параметров структуры плазмонных дифракционных решеток

Ручкина М.А., студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Лазерные и оптико- электронные приборы»*

Научные руководители: Одинокоев С.Б., д.т.н, профессор

Жердев А.Ю., аспирант

Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана

odinokov@bmstu.ru

zherdev@bmstu.ru

Новый виток в исследовании плазмонных структур осуществил японский ученый *Satoshi Kawata*, который использовал плазмоны для восстановления изображения [1]. Он восстанавливал голографические изображения, которые сохраняли свои естественные цвета при подсвечивании белым светом под разными углами. Погружаясь глубоко в анализ дифракционной решетки находим один из наиболее распространенных и универсальных методов решения прямой задачи дифракции электромагнитного излучения на периодических структурах, а именно, метод Фурье - мод, он предназначен для моделирования структур, состоящих из набора прямоугольных слоев, в вычислительном ядре реализовано автоматическое представление многослойных меандровых и синусоидальных слоев в виде набора таких слоев. В своей классической формулировке метод Фурье - мод позволяет моделировать дифракцию плоской электромагнитной волны на многослойной дифракционной решетке. Результатом решения данного метода являются комплексные амплитуды и, следовательно, интенсивности отраженных и прошедших порядков дифракции.

Исследовались прямоугольные [2] и синусоидальные и дифракционные решетки. Анализировались периоды дифракционной решетки от 200 нм до 800 нм, высоты рельефа дифракционных решеток от 0 нм до 150 нм, толщины металлических слоев от 10 нм до 150 нм, толщины диэлектрических слоев от 10 нм до 50 нм. Рассматривались «-1», «0» и «+1» проходящие и отраженные дифракционные порядки. В ходе исследований строились графики зависимости интенсивности дифракционного порядка от длины волны, угла

падения излучения и от глубины профиля дифракционной решетки. Оценивалось влияние изменения параметров дифракционной решетки на плазмонный эффект.

Прямоугольные решетки

Решетки с прямоугольным профилем имеют наибольшую максимальную интенсивность дифракции света. Исследуемые структуры должны содержать как минимум один металлический слой, окружённый слоями диэлектрическими, в самом вырожденном случае – воздухом. На металлический слой желательно напылять SiO_2 , он используется для расширения цветовой дисперсии угла падения. Также были исследованы структуры с различными напылениями такими как Au , Cu , Al . Исследования показали, что оптимальными параметрами обладает структура, показанная на рис. 1.

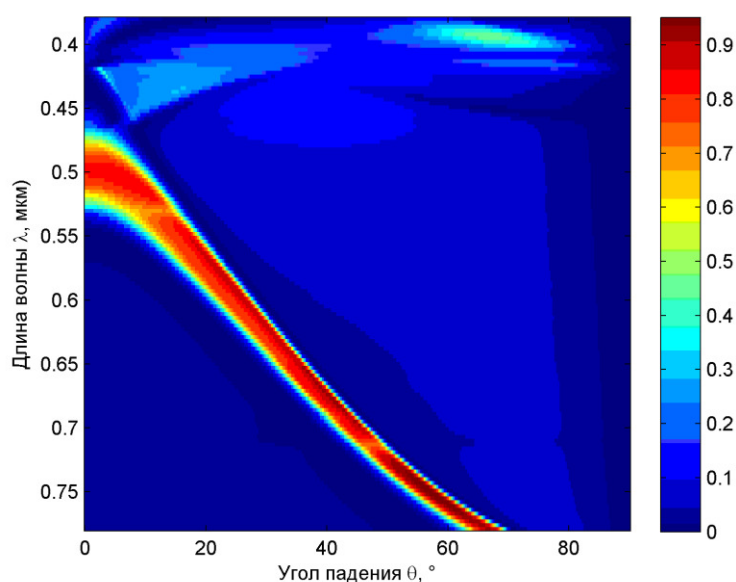


Рис. 1. Зависимость интенсивности пропускания 0-го порядка дифракции от длины волны и угла падения

Структура имеет период 400 нм, толщину слоя Ag – 40 нм, глубину профиля решетки – 40 нм. Насыщенно-красный цвет свидетельствует о высоком коэффициенте пропускания – 90 %, т.е. данная структура при ортогональном падении излучения (т.е. под углом $\theta = 0^\circ$) имеет такое спектральное распределение интенсивности $T0$ порядка (т.е. коэффициент пропускания), что в полосе длин волн от 475 до 525 нм пропускание достигает 90 %, а вне этой полосы пропускание практически нулевое. Максимумы

наблюдается практически во всем видимом диапазоне длин волн при соответствующих углах падения.

Синусоидальные решетки.

Исследуемая структура выглядит так: нижним слоем является стекло, над стеклом находится фоторезист, выше слоя фоторезиста – слой Ag . На серебро желательно напылять SiO_2 . Также были исследованы структуры с различными напылениями такими как Au , Cu , Al . Согласно исследованиям оптимальными параметрами обладает структура, диаграмма зависимости интенсивности $T1$ порядка дифракции от длины волны и угла падения которой показана на рис. 2.

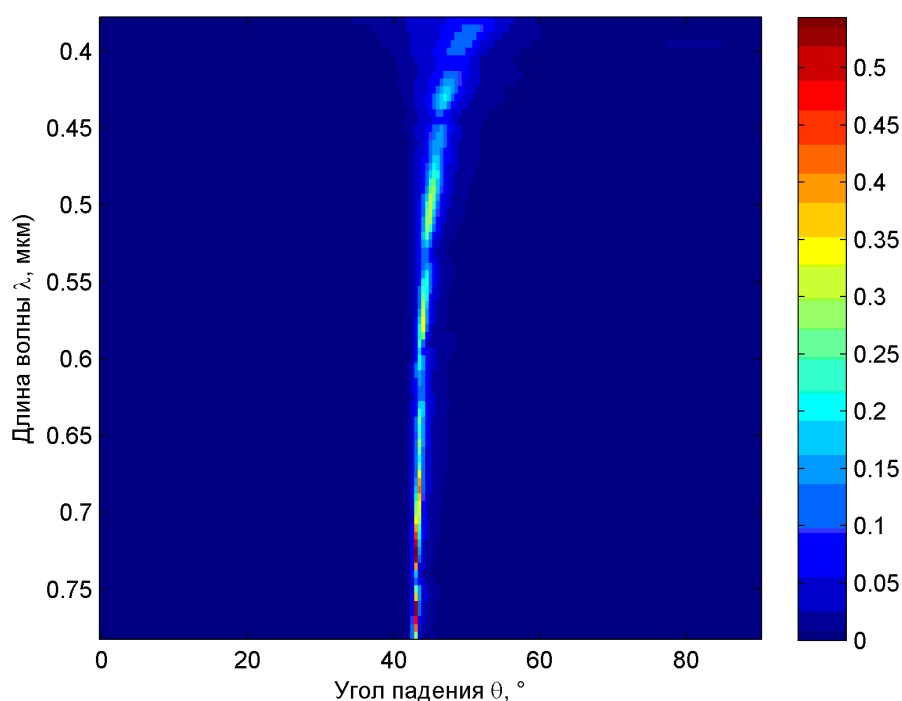


Рис. 2. Зависимость интенсивности пропускания 1-го порядка дифракции от длины волны и угла падения

Структура имеет период 750 нм, толщину слоя Ag – 40 нм, глубину профиля решетки – 40 нм и толщину фоторезиста – 150 нм. Насыщенно-красный цвет свидетельствует о высокой дифракционной интенсивности – 50 %, т.е. данная структура при ортогональном падении излучения под углом $\theta = 43.5^\circ$ имеет такое спектральное распределение интенсивности $T1$ порядка (т.е. коэффициент пропускания), что в полосе длин волн от 700 до 780 нм пропускание достигает 50 %.

Оптимизация.

Ввиду того, что при анализе синусоидальной структуры задача усложняется дискретизацией синусоиды, время расчёта со средней точностью значительно растёт, также в синусоидальной структуре плазмонный эффект, лежит в более узкой области углов падения, оптимизация проводится для прямоугольной структуры.

В среде *MATLAB* был создан оптимизационный блок, позволяющий проводить оптимизацию параметров падающей волны и геометрических параметров многослойных металлодиэлектрических дифракционных структур с прямоугольным профилем. Задача оптимизации сводится к тому, чтобы создать спектральный фильтр, который будет работать при заданных условиях. Выходными параметрами оптимизационного блока являются оптимизированные дифракционные решетки и/или параметры падающей волны. Реализованы три варианта критерия оптимизации.

Критерий 'MeanOverMean'. Пусть задан некий изменяемый параметр падающей волны. Будем считать, что это длина волны λ . В этом случае массив длин волн содержит значения $\lambda_i, i=1..N$. Также задаются границы целевого диапазона длин волн $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$. Значение критерия F_1 при этом вычисляется следующим образом:

$$F_1 = - \frac{\sum_{\lambda_i \in [\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]} f_i / |\{i: \lambda_i \in [\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]\}|}{\sum_{\lambda_i \notin [\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]} f_i / |\{i: \lambda_i \notin [\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]\}|},$$

где $f_i, i=1..N$ – значения оптимизируемого поля. Таким образом, данный критерий представляет собой отношение среднего значения оптимизируемого поля в целевом диапазоне значений изменяемого параметра к среднему значению оптимизируемого поля вне целевого диапазона (отсюда название критерия – «среднее, деленное на среднее»).

Критерий 'Rect'. Пусть, как и в предыдущем случае, изменяемый параметр – длина волны, и заданы значения $\lambda_i, i=1..N, [\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$. Значение критерия F_2 вычисляется следующим образом:

$$F_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[f_i - \text{rect} \left(\frac{\lambda_i - \frac{\lambda_{\max} + \lambda_{\min}}{2}}{\frac{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}{2}} \right) \right]^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[f_i - \text{rect} \left(\frac{2\lambda_i - \lambda_{\max} - \lambda_{\min}}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}} \right) \right]^2,$$

где $rect$ – прямоугольная функция:

$$\text{rect}(t) = \begin{cases} 0, & |t| > \frac{1}{2}, \\ \frac{1}{2}, & |t| = \frac{1}{2}, \\ 1, & |t| < \frac{1}{2}. \end{cases}$$

Таким образом, данный критерий представляет собой среднеквадратическое отклонение спектра оптимизируемого поля f_i от «идеального» прямоугольного спектра.

Критерий 'Point'. При использовании данного критерия предполагается, что существует только одно значение параметра, которому соответствует значение оптимизируемого поля f . Критерий F_3 имеет вид:

$$F_3 = -f.$$

Таким образом, критерий 'Point' максимизирует значение оптимизируемого поля в одной точке.

В качестве примера рассмотрим оптимизацию пропускающих спектральных фильтров на основе однослойных металлических прямоугольных решеток, находящихся в воздухе, такой тип структур был рассмотрен в работе [5]. На основе ранее рассчитанной нами структуры, выберем дифракционную решетку с прямоугольным профилем, имеющую период – 400 нм, толщину слоя серебра – 40 нм и глубину профиля решетки – 40 нм. Такие параметры решетки для расчета оптимизации выбраны не случайно. Решетка с данными параметрами имеет наибольшую интенсивность пропускания света. Предполагается, что в качестве материала подложки используется произвольный прозрачный диэлектрический материал. Во всех расчётах принималось, что в качестве подложки выступает воздух, т.е. изучались свойства серебряного меандра в воздухе. Рассматриваем $T0$ порядок дифракции (пропускание). Графики результатов расчетов показаны на рис. 3 и рис. 4. Расчеты проводились по трем критериям как для длины волны, так и для угла падения (табл. 1,2).

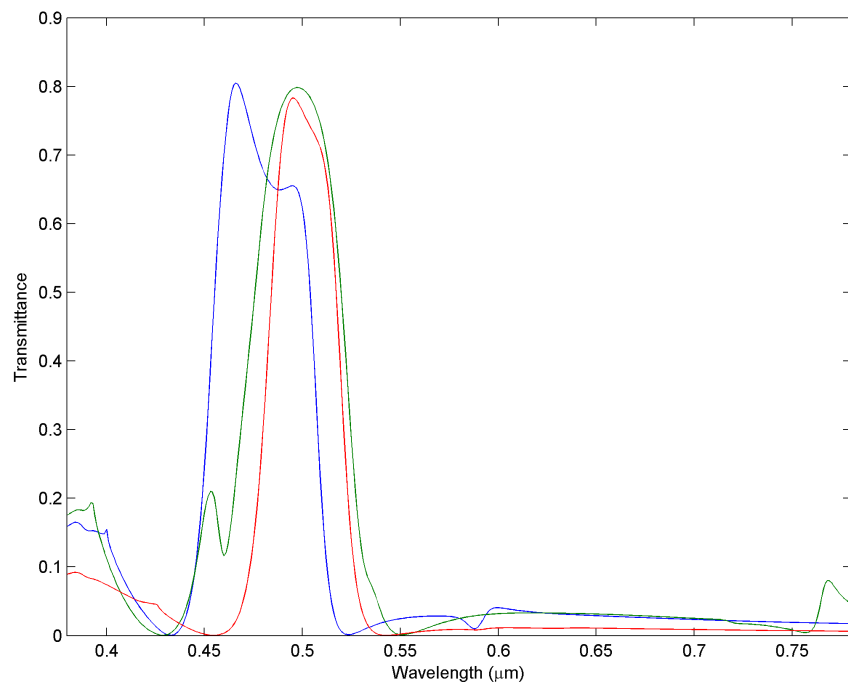


Рис. 3. Зависимость дифракционной интенсивности от длины волны. Синим цветом показан спектр пропускания заданной структуры, зеленым цветом – спектр структуры, рассчитанной случайным набором точек, красным цветом – спектр оптимизированной структуры

Спектр оптимизированной структуры по сравнению с исходным спектром имеет более обтекаемую, флюидную форму гауссовой кривой, «хвосты» кривой значительно уменьшены по площади, что компенсирует падение дифракционной интенсивности. Расчет был проведен по критерию *'MeanOverMean'*. Рассматриваемый исследуемый диапазон – от 475 нм до 525 нм.

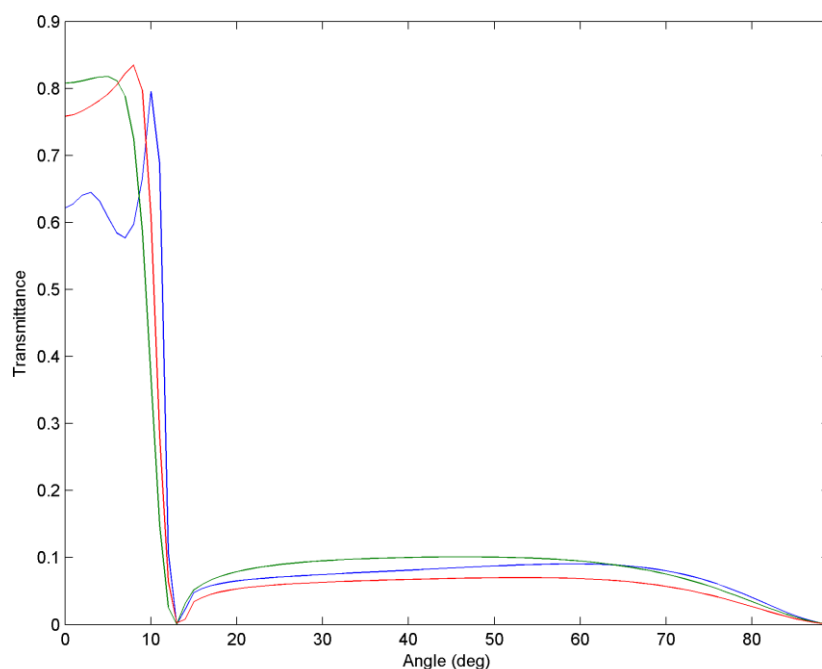


Рис. 4. Зависимость дифракционной интенсивности от угла падения излучения. Синим цветом показан спектр пропускания заданной структуры, зеленым цветом – спектр структуры, рассчитанной случайным набором точек, красным цветом – спектр оптимизированной структуры

Спектр оптимизированной структуры по сравнению с исходным спектром имеет более гладкую форму кривой, слабее выражен краевой эффект. Дифракционная интенсивность увеличена и что самое главное, она имеет около 80 % пропускания во всем исследуемом диапазоне. Расчет был проведен по критерию 'Rect'. Рассматриваемый исследуемый диапазон – от 0 ° до 10 °.

Таблица 1

Геометрические параметры оптимизированных дифракционных структур по длине волны

Структура, критерий	Период d , нм	Амплитуда меандрового профиля a , нм	Толщина металлической пленки, нм
<i>MeanOverMean</i>	426	32	50
<i>Rect</i>	417	35	41
<i>Point</i>	390	46	23

Геометрические параметры оптимизированных дифракционных структур по углу падения излучения

Структура, критерий	Период d , нм	Амплитуда меандрового профиля a , нм	Толщина металлической пленки, нм
<i>MeanOverMean</i>	402	34	50
<i>Rect</i>	399	36	42
<i>Point</i>	300	42	12

С точки зрения визуальной оценки спектров лучшим критерием представляется критерий '*Rect*'. В случае, когда наиболее важно уменьшение оптимизируемой величины вне целевого диапазона длин волн, следует использовать критерий '*MeanOverMean*'. В тех случаях, когда важно достижение нужных оптических свойств вблизи некоторой фиксированной длины волны, следует использовать критерий '*Point*'. В силу относительно быстрого расчета структуры, полученные в результате использования этого критерия, могут также быть использованы в качестве стартовых точек при проведении расчетов на основе других целевых функций.

Список литературы

1. Satoshi Kawata, Miyu Ozaki, Jun-ichi Kato, Surface-plasmon holography with white light illumination // SPIE Proceedings, 2012, Vol. 8455, P.6.
2. Liwei Fu, Heinz Schweizer, Thomas Weiss, and Harald Giessen, Optical properties of metallic meanders // J. Opt. Soc. Am., 2009, B 26, P.111-119.
3. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 721 с.
4. Климов В.В. Наноплазмоника. М.: Физматлит, 2010. 480 с.