

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ  
Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра радиотехники и электродинамики  
наименование кафедры

**Дифракция и фильтрация в оптическом диапазоне на слое ENZ-  
метаматериала на подложке**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студента **4** курса **4032** группы

направления 03.03.03 «Радиофизика»

код и наименование направления

института физики

наименование института

Курдюкова Дмитрия Сергеевича

фамилия, имя, отчество

Научный руководитель

профессор, д.ф.-м.н., профессор

должность, уч. ст., уч. зв.

личная подпись, дата

М.В. Давидович

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

д.ф.-м.н., профессор

уч. ст., уч. зв.

личная подпись, дата

О.Е. Глухова

инициалы, фамилия

Саратов 2022 г.

## Содержание:

Введение.....	3
Глава 1. Метаматериалы.....	
1.1 ENZ-метаматериалы.....	4
1.2 Физическое обоснование диэлектрической проницаемости металла. Формулы смещения. Получения формул для диэлектрической проницаемости слоя.....	6
1.3 Уравнения Френеля для случая слоистого метаматериала: вывод формул для коэффициента отражения и пропускание через волновые вектора и сшивание матриц передач. P- и S- поляризация для слоя....	8
Глава 2. Получения диэлектрической проницаемости слоя метаматериала численными методами.....	
2.1 Получения графиков зависимости диэлектрической проницаемости слоя от длины волны по формуле Гарнетта, Максвелла ...	10
Глава 3. Получения коэффициентов отражения и пропускания ENZ- метаматериала численными методами.....	
3.1 Получения графиков зависимости коэффициентов отражения и пропускания ENZ-метаматериала.....	11
Заключение.....	12
Список литературы.....	13

## Введение:

Часто под метаматериалами (ММ) понимают периодические структуры, созданные на основе различных технологий. ММ – это искусственная среда (ИС) с “одновременно отрицательными”  $\epsilon$  (диэлектрическая проницаемость) и  $\mu$  (магнитная проницаемость) или с отрицательной групповой скоростью.

Под ENZ-метаматериалом понимают материал, чья диэлектрическая проницаемость  $\epsilon \ll 0$  (близка к 0).

Основная задача метаматериалов – при помощи оптических законов добиться новых свойств вещества, к примеру: добиться маскировки тела, снизить или поглотить температуру объекта и т.д.

Главная проблема, которая описывается в нашей работе – это воссоздать отрицательную диэлектрическую проницаемость вещества ( $\epsilon \leq 0$ ,  $\epsilon \ll 1$ ), которой нет в природе, искусственными методами, в нашем случае, это стеклянный слой, который имеет слой вкрапленных в неё металлических шариков, в нашем случае, из серебра и меди.

Целью работы является:

- 1- Найти угловые частоты  $\omega$ , при которых наблюдается максимальное отражением в оптическом диапазоне УФ и видимом спектре.
- 2- Нахождение эффективной диэлектрической проницаемости слоя формулами Максвелла и Гарнетта с проверкой достоверностью полученных результатов.

## 1.1 ENZ- метаматериалы

Под ENZ-метаматериалами (Epsilon New Zero) назовем такие метаматериалы, диэлектрическая проницаемость материала которых будет около нуля. Обычно такие метаматериалы изготавливаются из тонких металлических структур, состоящих из очень маленьких отверстий.

Отрицательной диэлектрической проницаемостью обладают металлы в приближении без диссипации с диэлектрической проницаемостью:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_L - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}$$

Где:

$\varepsilon_L$  – диэлектрическая проницаемость Лоренца.

$\omega_p$  – плазменная частота.

Диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon$  и магнитная проницаемость  $\mu$  являются основными характеристиками, которые определяют распространение электромагнитных волн в веществе. Это связано с тем, что они являются единственными параметрами вещества, входящими в дисперсионное уравнение.

$$\frac{\omega}{c} \varepsilon \mu - k^2 \delta + k = 0$$

которое задает связь между частотой  $\omega$  монохроматической волны и ее волновым вектором  $k$ .

В том случае, если вещество изотропно, уравнение упрощается:

$$k^2 - \frac{\omega^2}{c^2} n^2$$

Здесь  $n^2$  — квадрат коэффициента преломления вещества, равный  $n^2 = \varepsilon \mu$

Оптимальное расположение этих отверстий позволяет свету проходить через них, но совершенно иначе, чем через более крупные отверстия, особый способ соединения этих отверстий с помощью извилистых линий, которые придают этим метаматериалам дополнительные характеристики.

Как только поведение новой структуры становится известно, разрабатывается и изготавливается поляризатор, позволяющий контролировать и изменять направление света, проходящего через структуру.

Простейшие слоистые ENZ-материалы имеют плоскоструктурную структуру из двух или трех слоев. Наиболее часто используют чередование металлического или полупроводникового слоя и диэлектрического слоя. Поскольку необходимо большое число периодов, изготовление микроструктур и наноструктур требуют много технологических операций.

## 1.2 Оптическое обоснование диэлектрической проницаемости материала.

Формулы смещения. Получения формул для диэлектрической проницаемости слоя.

Относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрических материалов считается больше единицы независимо от частоты света. Для металлов оптические свойства различны и зависят от двух фактов:

1. Электроны в зоне проводимости от связи каждого атома или молекулы и может свободно перемещаться внутри материала (металла).
2. Межзонные возбуждения между валентной зоной и зоной проводимости могут возникать только в том случае, если энергия падающих фотонов превышает ширину запрещенной зоны между ними в металле.

В 20 веке немецкий физик Пауль Друде в попытке описать оптика с использованием уравнений Максвелла использовал кинетическую теорию газов для объяснения движений электронов в металлах. Он использовал три предположения:

1. Взаимодействие между электронами и ионами при столкновениях отсутствует.
2. Электронное рассеяние пренебрегаем.
3. Вероятность столкновения в единицу времени для электронов равно  $\frac{1}{\tau}$ , где  $\tau$  - интервал времени между двумя близкими столкновениями электронов.

Формула Друде-Лоренца будет выглядеть так:

$$\varepsilon_{D-L}(\omega) = \varepsilon_{\infty} - \frac{\omega_p^2}{\omega_d^2 + \omega} + i \frac{\omega_p^2 \omega_d}{\omega(\omega^2 + \omega_d^2)}$$

$$\omega_p = \frac{Ne^2}{\varepsilon_0 m_e}$$

Формулы смещения, а именно формула Гарнетта и формула Максвелла будут выглядеть так:

$$\varepsilon_{eff} = \varepsilon_m + 3p \frac{\varepsilon_m(\varepsilon_i - \varepsilon_m)}{(\varepsilon_i - 2\varepsilon_m) - p(\varepsilon_i - \varepsilon_m)}$$

$$\varepsilon_{eff} = \varepsilon_1 \left( 1 + 3f_2 \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 + 2\varepsilon_1} \right)$$

1.3 Уравнения Френеля для случая слоистого метаматериала: вывод формул для коэффициента отражения и пропускание через волновые вектора и сшивание матриц передач. P- и S- поляризация для слоя.

Для описания волны, которая будет проходить через слой метаматериала служит уравнения Френеля через входящие в него волновые вектора. Для этого мы рассмотрим волновые векторы через дисперсионное уравнение:

$$k_z^2 = \varepsilon_{img} * k_0^2 - k_x^2$$

Зная дисперсионное уравнение и тот факт, что коэффициенты прохождения (T) и отражения (R) от границы выражаются через характеристический импеданс, который определяется как отношение комплексных амплитуд тангенциальных компонент полей он равен:

$$Z = \frac{k_z}{\varepsilon_{img} * k_0}$$

Выразим коэффициенты отражения R и прохождения T от границы через импедансы сред.

Сшивка тангенциальных составляющих полей дает систему уравнений:

$$\begin{cases} 1 + R = T \\ Z_1(1 - R) = Z_2 T \end{cases}$$

Где:

$Z_1, Z_2$  – импедансы сред 1 и 2 соответственно (воздух + материал)

Тогда коэффициенты отражения и прохождения примут вид:

$$R = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}$$
$$T = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2}$$

Если будем рассматривать любую среду на слое, к примеру, стекло, то импеданс  $Z$  примет вид:

$$Z = \frac{r_0 * (Z_0 + i r_0 * \tan(\theta))}{r_0 + i * t * Z_0 * \tan(\theta)}$$

Где:

$r_0 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_{img}}}$  – волновое сопротивление,

$Z_0$  – импеданс среды (на которой находится материал в нашем случае стекло)

$\theta$  – набег фазы,

$t$  – толщина слоя.

Применив закон сохранения энергии, получим соотношения:

$$|R|^2 + |T|^2 = 1$$

Перейдем к матрицам передач. Данная матрица, используемая для решения наших задач представлена ниже:

$$\hat{a} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & i * \sin(\theta) \\ \frac{i * \sin(\theta)}{r_0} & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

Поля  $E_x$  к  $H_y$  будут представлены как:

$$\begin{cases} E_x = (1 + R) \\ H_y = \frac{(1 - R)}{r_0} \end{cases}$$

Сделаем сшивая системы уравнений получим:

$$T = \frac{2}{a_{11} + a_{22} + \frac{a_{12}}{r_0} + r_0 a_{21}}$$

Значения для  $R$  можно найти, вычисляя импеданс материала  $Z$  из матриц передач:

$$Z = \frac{(a_{11} + a_{12})}{(a_{21} + a_{22})}$$

Отсюда  $R$ :

$$R = \frac{(Z - 1)}{(Z + 1)}$$

## 2.1 Получения графиков зависимости диэлектрической проницаемости слоя от длины волны по формуле Гарнетта, Максвелла

Для получения графиков зависимости диэлектрической проницаемости слоя от длины волны, мы взяли в рассмотрении два металла, а именно медь и серебро, которые будут использоваться в качестве металлических шариков в стеклянном слое, состоящего из стекла.

Расчет диэлектрической проницаемости металлических шариков производили по формуле Друде-Лоренца.

Выделим в ней действительную и мнимую часть, необходимую для расчета.

Получим:

$$\varepsilon_{re} = \varepsilon_{\infty} - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}$$
$$\varepsilon_{im} = \frac{\omega_d(\varepsilon_{\infty} - \omega_p^2)}{\omega(\omega^2 + \omega_d)}$$

Угловую частоту  $\omega$  мы взяли, полагаясь на диапазон частот, которую нашли по формуле:

$$\omega = 2\pi * \frac{c}{\lambda}$$

Где

$\lambda$  — длина волны.

Диапазон  $\lambda$  для меди, где наблюдается диэлектрическая проницаемость около единицы (ENZ), был взят от 300 нм до 450 нм с шагом 1 нм, что соответствует УФ и видимому диапазону длин волн.

Для серебра был взят диапазон длин волн где,наблюдается диэлектрическая проницаемость около единицы (ENZ), от 400 до 550 нм с шагом 1 нм, что соответствует УФ и видимому диапазону длин волн.

### 3.1 Получения графиков зависимости коэффициентов отражения и пропускания ENZ-метаматериала

В качестве исследования для нашей работы, рассмотрим слой метаматериала, диэлектрическая проницаемость которого рассчитана по формуле Максвелла, а именно слой, состоящий из стекла с вкраплением металлических шариков серебра.

Были выполнены следующие задачи и получены графики зависимости, а именно:

1-Рассчитав коэффициенты отражения и прохождения плоской волны через слой, при различной толщине слоя (200,500,1000 нм), через сшивание матриц передач и уравнений Френеля и через импедансы полей, мы получили зависимость данных коэффициентов от угловой частоты  $\omega$  (Рад/с) и фазового набега  $\Theta$  ( $^\circ$ ).

2- Сделали расчет коэффициентов отражение и прохождение в том случае, если слой находится на стекле, при различной толщине слоя (200,500,1000 нм), ( $\epsilon_{\text{стекла}}=3$ ) и получили зависимости данных коэффициентов от угловой частоты  $\omega$  (Рад/с).

3- Нашли коэффициенты отражения и прохождение при помощи импедансов и волновых векторов, в случае падение угла  $\alpha$  (угла падения). Рассмотрели случаи падения угла под 30, 60 и 75 градусов и получили зависимости данных коэффициентов от угловой частоты  $\omega$  (Рад/с) (толщину слоя взяли 1000нм).

4- Численно рассчитали значение при Р- и S- поляризации для слоя (отношение E/H) (толщину слоя взяли 500нм).

## Заключение.

В ходе представленной работы получены результаты: нашли угловые частоты  $\omega$ , при которых наблюдается максимальное отражением в оптическом диапазоне УФ и видимом спектре и рассчитали эффективные диэлектрические проницаемости слоя формулами Максвелла и Гарнетта с проверкой достоверностью полученных результатов. Кроме этого, нами были представлены различные поведение коэффициентов отражение пропускание для слоя ENZ-метаматериалов в зависимости от состояния угла падения, положения слоя на стекле, рассмотрели для этого два метода, при котором можно решить ту же самую задачу, а именно через сшивание матриц передач и импедансов волновых векторов.

Из этого следует то, что максимумы коэффициента отражения достигались в тех частотах, где диэлектрическая проницаемость была близка к 0, что соответствовала ENZ-метаматериалам.

Это может быть полезно в улучшении направленности излучения антенн, построения элементов оптических наноцепей при помощи оптических изоляторов, покрытия, обеспечивающее невидимость или прозрачность объекта, из-за максимального коэффициента отражения.

Так же использование многослойных структур с внедрением металлических объектов позволить создавать полосно-пропускающие и полосно-заграждающие оптические и ИК- устройства

## Список используемой литературы.

- 1- М.В. Давидович *Метаматериалы 20 лет спустя: применения и перспективы* // УФН. - 2018. - С. 49.
- 2- М.В. Давидович *Гиперболические метаматериалы: получения, свойства, применения, перспективы* // УФН. - 2019. - С. 36.
- 3- Пачеко-Пенья В., Торрес В., Беруэте М., Наварро-Сиа М., Энгета Н. *Квазиоптические устройства с градиентным преломлением  $\epsilon$ -около нуля (ENZ) // управление и разделение миллиметровых волн* // Оптический журнал , 2014, № 9: 094009.
- 4- Зоммерфельд А. *Электродинамика* // М.:И.Л // 1958. – С. 505.
- 5- Ф. Г. Басс, А. А. Булгаков, А. П. Тетервов. *Высокочастотные свойства полупроводников со сверхрешетками* / М. : Наука, 1989. – 286.
- 6- Ландау Л.Д, Лифшиц Е.М. *Электродинамика сплошных сред* // М.: Наука //1982. – С.32
- 7-Ю.Н.Барабаненков, М.Ю.Барабаненков *Гомогенизация случайно-микроструктурированных метаматериалов и проблема искусственного квазимагнетизма* // Труды школы-семинара "Волны-2010". Секция 7 // 2010.
- 8 - Вартанян Т.А., Ващенко Е.В. *Введение в наноплазмонику. Учебное пособие.* - СПб: НИУИТМО, 2012.– 86 с.
- 9- Л.А. Вайнштейн. *Электромагнитные волны. Радиоисвязь.* 1988.
- 10- М. Борн, Э. Волф. *Основы оптики.* М.: Наука. 1973.
- 11- К.Р Симовский *О материальных параметрах метаматериалов. Оптика и спектроскопия.* 2009
- 22 - Alireza Rahimi Rashed *Enhanced transmission via epsilon-near-zero metamateria*: дис. Humeysa Caglayan *Ест. наук: USA, 2020.* - 79 с.
- 13-Дорофеенко А.В. *Управление светом с использованием неоднородных оптических и плазмонных систем: дис. д-р физ-мат. наук: 01.04.03.* - Москва, 2019. - 359 с.
- 14 - Mossotti O. *Discussione analitica* // Mem. Soc. Ital. – 1850. – V. 14. – P. 49.