

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

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

Кафедра радиотехники и электродинамики  
наименование кафедры

**Маскировка сферического объекта методом волнового обтекания с использованием ENZ- метаматериала.**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студента **4** курса **4032** группы

---

направления 03.03.03 «Радиофизика»

---

код и наименование направления

---

института физики

---

наименование факультета

---

**Корниенко Кирилла Михайловича**

---

фамилия, имя, отчество

Научный руководитель

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. О Метаматериалах.....	
1.1 Метаматериалы.....	4
1.2 ENZ - метаматериалы .....	5
1.3 Формулы смешения.....	6
Глава 2. Расчет диэлектрических проницаемостей для меди и серебра с помощью формул смешения.....	
2.1 Получение графиков действительной части диэлектрической проницаемости и эффективной ДП .....	7
Глава 3. Маскировка.....	
3.1 Методы маскировки.....	8
Заключение.....	9
Список литературы.....	10

## ВВЕДЕНИЕ

В нашем мире присутствует много различных материалов и веществ. Некоторые самые простые из них знакомы человечеству с древних времен, а некоторые открыли и обнаружили не так давно. Метаматериалы как раз и относятся к группе, которая не так давно стала доступна для исследований.

Впервые гипотеза о существовании материалов с отрицательным показателем преломления была предложена в 1967[1] году Виктором Веселаго. В те времена такая теория казалась нелепой и из разряда фантастики. Хотя и основатель теории пытался интенсивно найти подходящий под нее материал, все попытки были тщетными, ведь известные в тот момент материалы имели положительный показатель преломления, при этом доказать возможность существования такого Виктору Веселаго удалось. Позднее в 1990-ых годах в Англии группа ученых занялась изучением метаматериалов, рассеивающих электромагнитные излучения совершенно другим способом, как любые другие материалы.

Метаматериал — материал, свойства которого обусловлены не столько индивидуальными физическими свойствами их компонентов, сколько искусственно созданной периодической структурой[2]. Чаще всего, говоря о метаматериалах, имеют в виду материалы с отрицательным показателем преломления, т.е. веществам, которые демонстрируют свойства, нехарактерные для объектов, встречающихся в природе. При падении света на поверхность такого материала преломленный луч лежит по ту же сторону от нормали к поверхности, что и падающий.

Целью этой выпускной квалификационной работы является изучение свойств метаматериалов, разбор методов маскировки, нахождение диапазона электромагнитного излучения, при котором будет достигнута наилучшая маскировка с использованием диоксида кремния( $\text{SiO}_2$ ) с вкраплениями шариков меди( $\text{Cu}$ ) и серебра( $\text{Ag}$ ), а так же в нахождении способа для улучшения маскировки.

## 1. О метаматериалах

### 1.1 Метаматериалы

Метаматериалы, как говорилось выше – это композитные материалы, свойства которых обусловлены искусственно созданной переодической структурой. Метаматериалы состоят из элементов макроскопического размера, который в свою очередь помещены в некую однородную среду, в которой поглощение электромагнитного излучения крайне мало.[3] При этом, характерный размер постоянной решетки кристалла меньше электромагнитного излучения. Искусственная периодическая структура изменяет начальную диэлектрическую и магнитную проницаемости начального материала. Множество ученых называют метаматериал – искусственной средой, в которой диэлектрическая и магнитная проницаемости отрицательны.

Такие композиты реализуются при помощи интеграции в природный ресурс вкраплений атомов больших размеров. В этой работе будут рассматриваться вкрапления шариков меди и серебра.

Основной интерес в изучении метаматериалов состоит в том, что, изменяя размеры, формы и концентрации элементов в композите, можно наблюдать за необычными физическими явлениями. Например, коэффициент преломления и диэлектрическая или магнитная проницаемости могут изменяться в широких диапазонах. Существует уникальное свойство метаматериалов. Если взять диэлектрическую и магнитную проницаемости меньше нуля, то коэффициент преломления также будет отрицателен. Из этого следует одно из основных свойств метаматериалов – это отрицательная рефракция[4]

Теория метаматериалов заключается в описании гетерогенной структуры, другими словами, в описании структуры состоящей из нескольких элементов, эквивалентной эффективной однородной средой

### 1.3 ENZ - метаматериалы

Как говорилось выше, существуют слоистые-ENZ метаматериалы. ENZ это сокращение от английского Epsilon Near Zero. Из этого можно дать определение. ENZ-метаматериалы – это материалы, диэлектрическая проницаемость которых близка к нулю.

Такие уникальные свойства ENZ материалов могут позволить решить сложные задачи по применению оптики в различных сферах жизни человека. Например: усиление направленного света, быстрая оптическая коммутация и создание супер линз. [5]

Диэлектрическая проницаемость и магнитная проницаемость являются основными характеристиками, которые определяют распространение электромагнитных волн в веществе. Обычно, ENZ- метаматериалы изготавливаются из структуры, которая состоит из крайне тонкого металлического слоя, с огромным множеством отверстий.[6]

Диэлектрическая проницаемость может быть описана моделью Друде-Лоренца, о ней будет подробно рассказано в следующей главе этой выпускной квалификационной работы.

## 1.5 Формулы смешения.

Для создания сложных структур с вкраплениями, необходимо изначально провести математический расчет.

В данный момент, наиболее точными и часто используемыми являются формулы смешения Максвелл-Гарнетта (она же Винер-Вагнера) и Бруггемана [7]

Формула Максвелл-Гарнетта

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

Где  $\varepsilon_{eff}$  – диэлектрическая проницаемость среды,  $\varepsilon_2$  – диэлектрическая проницаемость вкрапленного материала,  $\varepsilon_1$  – диэлектрическая проницаемость материала, без вкрапленного материала  $f_2$  – общая объемная концентрация вкрапленного материала ( $f_2 < \frac{1}{3}$ )

Формула нахождения эффективной среды в приближении Максвелла-Гарнетта

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

Где  $f_2 \ll 1$

Формула Бруггемана

$$f_1 \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_{eff}}{2\varepsilon_{eff} + \varepsilon_1} + f_2 \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_{eff}}{2\varepsilon_{eff} + 2\varepsilon_2} = 0 \quad (3)$$

Для системы подобного формата Бруггеманном было предложено понятие «приближении эффективной среды». Считается, что вкрапления материалов с разными диэлектрическими проницаемостями находятся в эффективной среде.

## 2. Расчет диэлектрических проницаемостей для меди и серебра с помощью формул смешения

### 2.1 Получение графиков действительной и мнимой части диэлектрической проницаемости и эффективной ДП

В этой части выпускной квалификационной работы будет рассмотрен способ вычисления диэлектрической проницаемости металла, а также диэлектрической проницаемости металла, который будет интегрирован в слой диэлектрика, а также будет рассчитана гетерогенная система.

Для того что бы рассчитать диэлектрическую проницаемость слоя из SiO<sub>2</sub> с внедренными шариками из серебра и меди, необходимо использовать модель Друде – Лоренца. Формула имеет следующий вид:

$$\varepsilon_m = \varepsilon_L - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 - i\omega\omega_c} \quad (4)$$

С помощью подобной модели Друде-Лоренца[8], мы можем найти диэлектрическую проницаемость металла, который в последствии будет вкраплен в слой SiO<sub>2</sub>.

В результате, Были выполнены следующие задачи и получены графики зависимости:

1. Рассчитав действительную и мнимую часть диэлектрической проницаемости, была найдена зависимость действительной и мнимой части ДП от длины волны для меди серебра
2. На основе полученных значений, также была рассчитана эффективная ДП для меди и серебра
3. Было сделано приближение эффективной ДП, при котором достигается наилучшая маскировка с использованием слоя из SiO<sub>2</sub> с вкрапленными шариками меди или серебра.

## 3 Маскировка

### 3.1 Методы маскировки

В нашем мире существует множество вариантов и методов маскировки. В природе это криптическая, дизруптивная, скрадывающая окраски.

Однако, с развитием науки, и особенно науки о метаматериалах, сложность реализации хорошей маскировки и устройств, который могут распознать замаскированный объект усложнились. Гонка в усовершенствовании методов маскировки продолжается и сейчас.

Метод маскировки, который направлен на скрытие от радаров, называется противолокационным. При таком методе используются рассеивающие покрытия. Это такие покрытия, которые отражают или поглощают направленное излучение. Обычно слоем рассеивающего покрытия покрывают бронированные поверхности.

Маскирующие покрытия, работающие в радиолокационной диапазоне частот, имеют положительные отличия от стелс покрытий, поскольку они обеспечивают снижение уровня рассеяния излучения радаров во всех направлениях, а не только в обратном. Самый популярный способ маскировки в данный момент – это маскировка, основанная на явлении волнового обтекания

Невидимость, которая достигается за счет явления волнового обтекания, заключается в том, что маскирующее покрытие, в котором находится сферический объект, заставляет падающие электромагнитные волны огибать помещенной во внутрь объект. Под структурой типа «еж» подразумевается структура, которая состоит либо из конусообразных, либо цилиндрических «наростов» на маскировочном слое. Такая структура имеет большое количество преимуществ. Благодаря такому способу нанесения маскировочного слоя, можно добиться уменьшения обратного рассеивания (отражения), а также, рассеивание вперед.



## Заключение

В этой выпускной квалификационной работе были рассмотрено понятие «метаматериалы». Были изучены их основные свойства, качества, возможные структуры, а также был рассмотрен способ реализации метаматериалов с помощью технологического процесса, наименование которого - гомогенизация. Была предложена модель слоя, с вкраплениями шариков металлов для дальнейшей маскировки сферического объекта. Также были рассмотрены методы смешения Максвелл Гарнетта и Брюгеманна для различных гетерогенных систем.

В ходе работы была применена модель Друде-Лоренца, необходимая для нахождения действительной и мнимой части диэлектрической проницаемости как в меди, так и в серебре. Из полученных значений были построены графики зависимости диэлектрической проницаемости от длины волн, для меди и серебра. С помощью формул смешения была найдена эффективная диэлектрическая проницаемость гетерогенных систем с вкраплениями металлов, таких как медь или серебро. Итоговые рассчитанные значения также были использованы в графике зависимости эффективной диэлектрической проницаемости от длины волны. Благодаря полученным значениям, был построен график с диапазоном, в котором будет осуществляться наилучшая маскировка сферического объекта в оболочке из  $\text{SiO}_2$ , с вкрапленными шариками меди или серебра.

Также были изучены способы и методы маскировки, которые поспособствовали в развитии технологий маскировки в области трансформационной оптики. В этой работе была применена маскировка путем волнового обтекания, поскольку основной целью нашей работы была маскировка сферического объекта. Была выбрана структура типа «еж», которая способна поспособствовать идеальной маскировке. Это достигается за счет геометрии, с помощью которой на сферический объект будет наноситься слой из диоксида кремния, с интегрированными в него шариками металла. Форма нанесения в виде цилиндров или конусов, способствует подавлению как обратного рассеивания, так и рассеивания вперед. <https://kak->

## Литература

- 1- В.Г.Веселаго В. Г. Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями  $\epsilon$  и  $\mu$  // УФН. - 1967. - С. 517-527
- 2- N. Engheta, Richard W. Ziolkowski, Physics and Engineering Explorations, p.1-15, 2006
- 3- И.Б. Вендик, О.Г. Вендик, Метаматериалы и их применение в технике сверхвысоких частот// Журнал технической физики, 2013, том 83, вып 1, С.3-5
- 4- Hoffman A.J., Alekseyev L., Howard S.S., Franz K.J., Wasserman D., Podolskiy V.A., Narimanov E.E., Sivco D.L., Gmachl C. Negative refraction in semiconductor metamaterials. Nature Materials, 2007, vol. 6, pp. 946-950
- 5- Farhad Ghasemzadeh, Enhanced transmission via epsilon-near-zero metamaterial// Master of Science Thesis, 2020, pp. 9-11
- 6- Mário G. Silveirinha, Andrea Alù, Alessandro Salandrino, Nader Engheta Epsilon-Near-Zero (ENZ) Metamaterials and Electromagnetic Sources: Tailoring the Radiation Phase Pattern // University of Pennsylvania Scholarly Commons. - 2007. - С. 15.
- 7- А.И. Ефимова, Л.А. Головань, П.К. Кашкаров, В.М. Сенявин, В.Ю. Тимошенко Инфракрасная спектроскопия систем пониженной размерности. Учебное пособие –Спб, 2016, С.24-31
- 8 - М. В. Давидович Плазмон-поляритоны вдоль поверхности асимметричного гиперболического метаматериал// СГУ имени Н.Г. Чернышевского, Нов. сер. Сер. Физика. 2019. Т. 19, вып. 4, С.289-290