

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ПРИКЛАДНОЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИТПЭ РАН)**



**ДВАДЦАТЬ ПЯТАЯ ЕЖЕГОДНАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
ИТПЭ РАН**

(Москва – 13–16 мая 2024 г.)

Сборник тезисов докладов

## **ДВАДЦАТЬ ПЯТАЯ ЕЖЕГОДНАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ИТПЭ РАН**

Сборник тезисов докладов.

Под редакцией д.ф.-м.н. В.Н. Киселя – М.: ИТПЭ РАН. 2024. – 74 с.

Сборник содержит тезисы докладов, представленных на Двадцать пятой ежегодной научной конференции Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук. Конференция посвящена обзору научных разработок и практических приложений, осуществленных в Институте в 2023 году. Целью конференции является обмен информацией, призванный дать импульс развития фундаментальным исследованиям по основным направлениям деятельности ИТПЭ РАН и ускорить практическое внедрение полученных результатов.

Организационный комитет  
академик РАН А.Н. Лагарьков  
д.ф.-м.н. А.М. Мерзликин  
д.ф.-м.н. В.Н. Кисель  
к.ф.-м.н. А.Т. Кунавин  
Е.В. Зеневич  
М.Е. Жукова

## УПОРЯДОЧЕННЫЕ СОСТОЯНИЯ В МОДЕЛИ АА ГРАФЕНА С ГРУППОЙ СИММЕТРИЙ SU(4)

А.В. Рожков, А.О. Сбойчаков, А.Л. Рахманов

ИТПЭ РАН

Мы исследуем возможные упорядоченные состояния двухслойного графена с АА упаковкой. Известно, что данный тип двуслойного графена обладает так называемым идеальным нестингом: в каждой долине имеется один электронный лист поверхности Ферми (ПФ), а также почти точно совпадающий с ним дырочный лист ПФ. Нестинг делает систему восприимчивой к диэлектрическим неустойчивостям разного вида. Из-за восьмикратного вырождения ПФ количество упорядоченных состояний может быть велико.

В такой ситуации возникает вопрос о возможности классификации упорядоченных фаз. Мы предлагаем схему на основе группы симметрий SU(4). Оказывается, что при некоторых предположениях группа симметрий гамильтониана включает в себя матричную группу SU(4), действующую в четырехмерном спин-долинном пространстве. Для гамильтониана с такой группой симметрий несложно показать, что параметр порядка  $Q$  – это матрица 4x4, преобразующаяся под действием SU(4).

Для  $Q$  нами получены уравнения самосогласования. Мы покажем, что эти уравнения допускают как эрмитовы, так и неэрмитовы решения. Эрмитовы решения могут быть сгруппированы в три топологически неэквивалентных класса. Первый класс соответствует волне зарядовой плотности. Второй класс включает в себя волну спиновой плотности, волну долинной плотности и волну спин-долинной плотности. Упорядоченные фазы, образующие класс номер три, представляют собой комбинацию всех вышеупомянутых типов волн плотности.

Для антиэрмитовой матрицы  $Q$  упорядоченные фазы характеризуются спонтанными межслоевыми кольцевыми токами. В зависимости от топологического класса решения, эти токи могут переносить зарядовые, спиновые, долинные и спин-долинные кванты. Мы также обсудим особый случай, когда матрица  $Q$  не является ни эрмитовой, ни антиэрмитовой.

В заключении мы проанализируем сильные и слабые стороны предлагаемой схемы классификации упорядоченных состояний АА графена и обсудим возможные обобщения.

## ГКР СПЕКТРОСКОПИЯ КАК МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕЗИСТЕНТНОСТИ БАКТЕРИЙ

**Е.А. Слипченко<sup>1</sup>, Р.Р.Сафиуллин<sup>1,2</sup>, К.Н. Афанасьев<sup>1</sup>,  
М.В. Седова<sup>1</sup>, И.А. Богинская<sup>1</sup>, И.А. Рыжиков<sup>1,3</sup>, Д.В. Басманов<sup>2,4</sup>,  
Ю.А. Беспярых<sup>4,5</sup>, К.А. Прусаков<sup>4</sup>, А.М. Мерзликин<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>ИТПЭ РАН

<sup>2</sup>МФТИ

<sup>3</sup>НОЦ ФМН – МГТУ им. Н.Э. Баумана

<sup>4</sup>ФГБУ ФНКЦ ФХМ ФМБА России

<sup>5</sup>РХТУ им. Д.И. Менделеева

Серьезной проблемой здравоохранения является устойчивость бактерий к антибиотикам [1]. Эффективный способ ограничить размножение резистентных бактерий – начать терапевтический процесс с наиболее эффективного лекарственного средства [2]. К сожалению, традиционные методы тестирования, основанные на репликации, обычно длятся 24 часа и могут достигать до 1 месяца для медленно растущих бактерий. Недавно были разработаны такие методы, как секвенирование генома, матричная лазерная десорбционно-ионизационная спектрометрия времени пролета, инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье и другие технологии, основанные на микрофлюидике [3]. Также для проверки жизнеспособности бактерий используют мониторинг нанодвижения бактерий с помощью атомно-силовой и оптической микроскопии [4]. Однако эти методы неуниверсальны и требуют сложного и дорогостоящего оборудования, вследствие чего разработка быстрых, простых и дешевых методов тестирования является актуальной задачей.

Спектроскопия гигантского комбинационного рассеяния (ГКР) как высокочувствительный метод совместно с математическими методами обработки данных может быть использован для быстрого анализа большого массива спектров аналитов. Ранее была предложена технология изготовления ГКР активных структур [5,6], и было показано, что полученные таким образом подложки подходят для изучения вирусов и белков [6–8]. Если предполагать, что резистентные особенности сопровождаются изменением химического состава, ГКР может стать удобным методом определения устойчивых штаммов.

В работе были исследованы три штамма бактерии *Staphylococcus aureus*, два из которых были резистентными и один – чувствительным к антибиотикам. Аликвоты предварительно подготовленных растворов, содержащих деактивированные бактериальные структуры, наносили на ГКР подложку по три капли объемом 3 мкл для каждого образца и высушивали при нормальных

условиях. В высушенном осадке измеряли по 30–40 ГКР спектров с трех капель в случайных местах осадка на длине волны возбуждения 785 нм, мощности лазера 54 мВт и времени накопления одного спектра 30 секунд. Были проведены работы по подбору оптимальных условий пробоподготовки. Было показано, что наиболее эффективным является лизирование с использованием керамических сфер с последующим центрифугированием и отбором супернатанта, что позволяет минимизировать соотношение сигнал – шум в спектрах. Также было обнаружено, что предварительная обработка поверхности серебра слабым щелочным раствором, по-видимому, улучшает химический контакт образец–подложка, что способствует увеличению количества областей в осадке, в которых можно наблюдать устойчивые высокоамплитудные ГКР спектры. Дополнительное центрифугирование образцов после размораживания также улучшает качества ГКР спектров.

Для обработки массива ГКР спектров, измеренных в оптимальных условиях пробоподготовки, была предложена модель логистической регрессии для классификации данных. Для реализации метода часть спектров использовали для обучения, а на оставшейся части проверяли модель. В результате проведенных расчетов было показано, что точность классификации при обучении и проверке модели на образцах для одного эксперимента составляет более 90%.

Таким образом, в результате проведения работы был предложен метод, позволяющий определять принадлежность ГКР спектров бактерий к различным классам на основе предварительно созданной библиотеки. Для этого подходит метод логистической регрессии. Одновременно исследования морфологии образца после нанесения на подложку и высушивания позволили определить устойчивые области, подходящие для измерения спектров, а также были определены параметры, позволяющие измерять большие массивы устойчивых ГКР спектров.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] A. van Belkum et al. // *Nat Rev Microbiol.* – 2020. – V. 18. – No. 5. – P. 299–311.
- [2] R.V. Milani et al. // *BMJ Open Qual. A.* – 2019. – V. 8. – No. 1.
- [3] G.D. Kaprou et al. // *Antibiotics (Basel).* – 2021. – V. 10. – No. 2. – P. 209.
- [4] M.I. Villalba et al. // *Proc Natl Acad Sci USA.* – 2023. – V. 120. – No. 18.
- [5] A.S. Baburin et al. // *Coatings.* – 2020. – V. 10. – P.911.
- [6] I.A. Boginskaya et al. // *Appl. Sci.* – 2019. – V. 9. – P.3988.
- [7] I.A. Boginskaya et al. // *J. Raman Spectrosc.* – 2021. – V. 52. – P. 1529–1539.
- [8] N.N. Durmanov et al. // *Sens. Actuators B Chem.* – 2018. – V. 257. – P. 37–47.

# АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПРЕДОБРАБОТКИ И АППРОКСИМАЦИИ ДАННЫХ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГКР ИССЛЕДОВАНИЙ БИОЛОГИЧЕСКИ ЗНАЧИМЫХ ВЕЩЕСТВ

Р.Р. Сафиуллин<sup>1,2</sup>, Е.А. Слипченко<sup>1</sup>, М.В. Седова<sup>1</sup>, И.А. Богинская<sup>1</sup>,  
И.А. Рыжиков<sup>1,3</sup>, З.М. Шибзухов<sup>1</sup>, А.М. Мерзликин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИТПЭ РАН

<sup>2</sup>МФТИ

<sup>3</sup>НОЦ ФМН – МГТУ им. Н.Э. Баумана

В данной работе анализируются методы предобработки и аппроксимации данных, полученных в экспериментах с использованием гигантского комбинационного рассеяния (ГКР), в частности, при изучении штаммов, резистентных и нерезистентных к различным антибиотикам бактерий, а также сердечного ангиотензинпревращающего фермента (АПФ) в плазме крови. Превышение нормального уровня АПФ сигнализирует о присутствии кардиальных рисков различного генеза. Исследование охватывает широкий спектр подходов к обработке данных, включая нормализацию, удаление шума, коррекцию фонового сигнала через вычитание базовой линии и увеличение объема выборки путем ее аугментации. Дополнительно применяются методы регуляризации и матричного разложения, такие как анализ главных компонент и неотрицательное матричное разложение для сокращения размерности данных и выявления ключевой информации в спектрах. Эта стратегия направлена на увеличение точности и правильности интерпретации результатов классификации, что имеет решающее значение для обработки массивов ГКР спектров и их применения в машинном обучении. Особое внимание уделяется анализу взаимного влияния выбранных методов на качество и достоверность моделей классификации. Для оценки эффективности использовалась F-мера, которая объединяет в себе показатели точности и полноты классификации моделью, представляя собой их гармоническое среднее.

Вычислительный этап включает обработку массивов данных выбранными методами и анализ качества представления спектрального массива в задаче классификации с использованием таких алгоритмов, как логистическая регрессия и метод опорных векторов, для оценки способности моделей различать спектры по их обобщенным характеристикам, полученным на основе выделенного массива наиболее значимых полос колебаний. Эксперименты по подбору параметров проводились методом перекрестной проверки для более устойчивой оценки результата. Исследование показало, какие параметры обработки важны

для анализа. Особо важным было понимание, что эффективнее удалять выбросы, анализируя необработанные спектральные данные, а не на стадии предварительной обработки, что улучшает точность результатов.

Дальнейший подбор оптимальных параметров для вычислительных экспериментов позволил настроить процесс обработки данных так, чтобы итоговая точность разделения различных групп спектров достигала 95%. Такой подход позволил не только улучшить качество классификации, но и обеспечить более высокую эффективность аналитического процесса в целом. Результаты исследования демонстрируют, как методы предобработки и аппроксимации влияют на конечные качественные и количественные результаты анализа ГКР спектров и обеспечивают возможность оптимизации аналитических процессов, начиная от нормализации и удаления шума до более сложных процессов, таких как вычитание базовой линии и увеличение выборки. Это предоставляет нам более глубокое понимание механизмов, лежащих в основе изучаемого явления.

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ГКР АКТИВНЫХ ПОДЛОЖЕК  
ИЗ САМООРГАНИЗОВАННОГО СЕРЕБРА ДЛЯ ДЛИНЫ ВОЛНЫ  
ВОЗБУЖДЕНИЯ 532 НМ**

**Я.Л. Поздняк<sup>1,2</sup>, К.Н. Афанасьев<sup>1</sup>, М.В. Седова<sup>1</sup>, И.А. Богинская<sup>1</sup>,  
И.А. Рыжиков<sup>1,3</sup>, А.М. Мерзликин<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>ИТПЭ РАН

<sup>2</sup>МФТИ

<sup>3</sup>НОЦ ФМН – МГТУ им. Н.Э. Баумана

Отсутствие одновременно эффективных, универсальных, воспроизводимых и дешевых подложек для реализации эффекта гигантского комбинационного рассеяния (ГКР) является до сих пор нерешенной проблемой, которая не позволяет использовать ГКР в коммерческих целях для медицинских анализов «на месте», мониторинга окружающей среды, судебно-медицинской экспертизы, контроля качества продуктов питания и т.д. [1]. Метод электронно-лучевого испарения зарекомендовал себя как наиболее подходящая технология для изготовления дешевых, воспроизводимых ГКР подложек при исследовании миоглобина с использованием возбуждающего излучения с длиной волны 785 нм [2].

В работе в качестве анализита использовался сывороточный альбумин человека (ЧСА), длина волны возбуждающего излучения 532 нм, а ГКР активность подложки возникала из-за шероховатого слоя серебра. Усиление комбинационного рассеяния на таких подложках связывают с локализацией плазмон-поляритонных волн на субволновых неровностях поверхности. Этот механизм автоматически приводит к резкой зависимости коэффициента усиления от расстояния до поверхности, которая неоднократно экспериментально наблюдалась [3]. Для изучения зависимости коэффициента усиления от расстояния до подложки для данной длины волны в работе использовалась стандартная техника диэлектрических спейсеров из  $Al_2O_3$ . Для всех полос колебаний с высоким соотношением сигнал–шум ГКР спектра ЧСА, при высыхании образующего кофе-ринг, было обнаружено слабое экспоненциальное затухание интенсивности спектра с характерной длиной затухания  $\approx 70$  нм, которое не характерно для ГКР активных подложек. Дополнительное исследование серебряных подложек показало их относительно невысокую эффективность (порядка – 3–4) относительно контрольных образцов: подложек из кремния и  $Al_2O_3$ .

Для увеличения эффективности подложек из серебра его шероховатость на наномасштабе была увеличена с помощью подслоя интерметаллида на основе олова и меди, при напылении на стекло формирующего развитую морфологию. На подслои был нанесен слой



серебра разной толщины и проанализирован коэффициент усиления и максимальная мощность лазера, при которой не происходит деградация аналита. В качестве конечной характеристики подложки выступила комбинация этих факторов, так как нет возможности использовать высокий коэффициент усиления, если отсутствует значительный теплоотвод. Выбранный подход позволил определить наиболее эффективные подложки, полученные описанным методом.

Таким образом, было показано, что дальное действие ГКР составляет порядка 70 нм, что значительно превышает значения из литературных источников и свидетельствует об отсутствии значительной локализации поля в морфологических особенностях подложки. Результаты исследований подложек с более развитой морфологией показали возможность увеличения эффективности серебряной пленки за счет использования теплопроводящих подслоев.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] C. Li et al. Towards Practical and Sustainable SERS: A Review of Recent Developments in the Construction of Multifunctional Enhancing Substrates // *Journal of Materials Chemistry C*. – 2021. – V. 9. – No. 35. – P.11517–52.
- [2] I. Boginskaya et al. SERS-Active Substrates Nanoengineering Based on E-Beam Evaporated Self-Assembled Silver Films // *Applied Sciences*. – 2019. – V. 9. – No. 19. – P. 3988.
- [3] C. Lee et al. Thickness of a Metallic Film, in Addition to its Roughness, Plays a Significant Role in SERS Activity // *Scientific Reports*. – 2015. – V. 5. – No. 1. – P. 11644.

## **ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ТРАВЛЕНИЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ СЕРЕБРЯНЫХ ГКР ПОДЛОЖЕК ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ**

**Ю.Ю. Звягина<sup>1</sup>, Е.А. Слипченко<sup>1</sup>, К.Н. Афанасьев<sup>1</sup>, И.А. Богинская<sup>1</sup>,  
М.В. Седова<sup>1</sup>, И.А. Рыжиков<sup>1,2</sup>, А.М. Мерзликин<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>ИТПЭ РАН

<sup>2</sup>НОЦ ФМН – МГТУ им. Н.Э. Баумана

С момента открытия явления гигантского комбинационного рассеяния (ГКР) света [1] интерес к разработке методов анализа с его использованием неуклонно растет. Одним из главных факторов, влияющих на качество проведенного анализа, является подложка, на которую осаждают анализируемое вещество. На сегодняшний момент представлен широкий ряд подложек разной природы и конфигурации, позволяющих проводить анализ с различными биологическими объектами [2]. Среди них особый интерес представляют твердотельные серебряные подложки, модифицированные с помощью электрохимического травления. По сравнению с другими подложками они имеют следующие преимущества: управление морфологией поверхности за счёт контроля потенциала с помощью электрода, наличие чистой и воспроизводимой поверхности для каждого анализа [3]. Чистая поверхность подложек, модифицированных электрохимическим травлением, несет на себе заряд, взаимодействующий с молекулами осаждаемого аналита, что способствует оптимальному контакту анализируемого вещества с ГКР поверхностью.

В работе представлены наноструктурированные серебряные ГКР-подложки, модифицированные электрохимическим травлением в растворе 0.01М КСl. Сами подложки представляют собой тонкую пленку серебра, нанесенную методом электронно-лучевого испарения на предметное стекло. Для усиления адгезии серебра на поверхности стекла предварительно был сформирован тонкий (порядка 10 нм) подслоя хрома. Характеризация поверхности подложек проводилась методом атомно-силовой микроскопии.

Для проведения электрохимического травления была сконструирована ячейка вертикального типа с возможностью проведения травления как в двухэлектродной, так и в трехэлектродной конфигурациях. В качестве источников напряжения, в зависимости от вида требуемой морфологии поверхности, использовались потенциостат-гальваностат Р-45Х и генератор сигналов специальной формы Гб-27. Травление проводилось в переменном поле с использованием циклической, импульсной и синусоидальной разверток потенциала. Напряжение на ячейке составляло от единиц до тысяч мВ в зависимости от проводимого режима травления.

На первом этапе исследований в качестве аналита был выбран водный раствор 4-меркаптофенилбороновой кислоты (МФБК) в концентрации 0.2 г/л, поскольку она химически связывается с серебряной поверхностью и формирует мономолекулярный слой на поверхности серебра. Для этого раствор наносили на подложку с помощью вымачивания протравленной области подложки в растворе МФБК в течение часа в условиях влажной камеры.

ГКР анализ проводился с помощью спектрометра комбинационного рассеяния на базе конфокального микроскопа WiTec Alpha 300 на длине волны возбуждения 532 нм и мощности 25 мВ.

Были получены зависимости интенсивности ГКР сигнала аналита от шероховатости подложки, которые показывают, что по сравнению с контрольным образцом без обработки сигнал значительно возрастает с увеличением шероховатости поверхности подложки. Также была определена зависимость морфологии подложек от режима электрохимического травления и выявлены оптимальные параметры для ГКР анализа используемого аналита.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Fleischmann M., Hendra P.J., McQuillan A.J. // Chem. Phys. Lett. – 1974. – V. 26. – No. 2. – P. 163–166.
- [2] Ge K., Hu Y., Li G. // Biosensors. – 2022. – V. 12. – No. 11.
- [3] Wen R., Fang Y. // J. Colloid Interface Sci. – 2005. – V. 292. – No. 2.

**УПРАВЛЯЕМОЕ ОСАЖДЕНИЕ БИОЛОГИЧЕСКИХ АНАЛИТОВ  
ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ КАЧЕСТВЕННОГО И КОЛИЧЕСТВЕННОГО  
ГКР АНАЛИЗА**

**А.Р. Нигматулин<sup>1,2</sup>, К.А. Верещагин<sup>2,3</sup>, К.Н. Афанасьев<sup>2</sup>, М.В. Седова<sup>2</sup>,  
И.А. Богинская<sup>2</sup>, И.А. Рыжиков<sup>2,4</sup>, А.М. Мерзликин<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>МФТИ

<sup>2</sup>ИТПЭ РАН

<sup>3</sup>ИОФ РАН

<sup>4</sup>НОЦ ФМН – МГТУ им. Н.Э. Баумана

Спектроскопия гигантского комбинационного рассеяния (ГКР) в настоящее время активно используется для качественного и количественного исследования аналитов различной природы. Важной проблемой остается низкая чувствительность метода для малых концентраций высокомолекулярных аналитов типа белков. При подобных концентрациях в ходе осаждения раствора на поверхности ГКР подложки происходит хаотичное распределение белка по поверхности, а также наблюдается кофе-ринг эффект (КРЭ) [1], что приводит к невоспроизводимым и низкоинтенсивным ГКР спектрам.

В данной работе мы на примере человеческого сывороточного альбумина (ЧСА) и миоглобина человека (МГЧ) рассмотрели метод пробоподготовки растворов белков с помощью импульсного лазера с длинами волн 1570 нм и 785 нм для улучшения распределения высушенного осадка на ГКР активных подложках. Ранее подобный метод с целью ослабления КРЭ и компактного высушивания раствора  $\text{CaSO}_4$  был использован в работе [2]: сфокусированный в центре капли раствора луч лазера 1570 нм, предположительно, способствует перенаправлению потока Марангони к центру капли, таким образом собирая молекулы аналита в одно пятно осадка, что повышает вероятность формирования однородного и компактного сухого осадка аналита и должно обеспечить большее количество вещества в фокальной области объектива спектрометра и, следовательно, более высокоамплитудные ГКР спектры. Лазер с длиной волны 785 нм одновременно с перераспределением потоков в капле аналита создает на серебряной поверхности в неоднородностях морфологии значительное усиление поля ( $\sim E^2$ ). Предположительно, места локализации поля способствуют созданию критической концентрации раствора для формирования зародыша кристалла аналита в выгодных для ГКР спектроскопии областях ГКР подложки.

В результате проведенных экспериментов по высушиванию растворов белков различных концентраций под лазером с длиной волны 1570 нм

удалось получить значительное повышение чувствительности ГКР (рисунок 1) для малых концентраций  $10^{-2}$  мкг/мл по сравнению с высушиванием без лазера для капель растворов ЧСА, при этом размер высушенных осадков был постоянным, без проявления эффекта КРЭ.

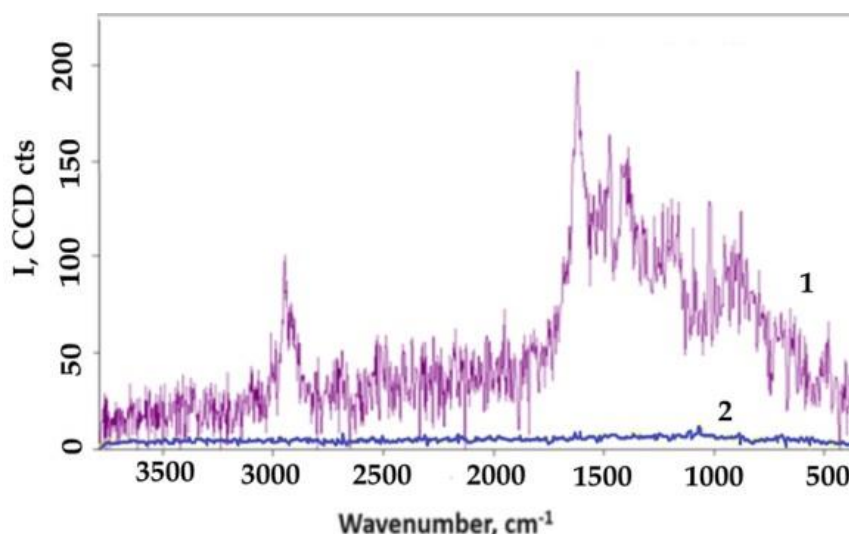


Рисунок 1 – 1) ГКР спектр ЧСА  $10^{-2}$  мкг/мл из высушенных под лазером 1570 нм капель, 2) ГКР спектр капель, высушенных без лазера

Для капель, высушенных под лазером 785 нм, были получены воспроизводимые ГКР спектры при малых концентрациях, тогда как в контрольной группе (капли тех же концентраций, высушенные без лазера) воспроизводимость и стабильность ГКР спектров не наблюдалась. Также при сушке под лазером наблюдали частичное сохранение КРЭ, а зависимость размеров капель от концентрации была немонотонной. При высушивании растворов белков на стекле без воздействия лазера была обнаружена линейная зависимость размера осадка от концентрации белка в логарифмических координатах, позволившая получить калибровочные кривые для контроля концентрации белка в исходном растворе.

Реализованный вышеописанным образом метод пробоподготовки с использованием импульсных лазеров на длинах волн 1570 нм и 785 нм позволяет количественно и качественно определять состав раствора. Эти результаты могут иметь важное практическое применение в биоаналитике и спектроскопии.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] S. Devineau et al. // Journal of the American Chemical Society. – 2016. – V. 138. – No. 36. – P. 11623–11632.
- [2] D. Li et al. // Analytical Chemistry. – 2021. – V. 93. – No. 25. – P. 8817–8825.

# МОДИФИКАЦИЯ ЛАЗЕРНЫХ МОД НЕОДНОРОДНОЙ НАКАЧКОЙ В ВОЛОКОННОМ ЛАЗЕРЕ

Д.К. Высоких<sup>1</sup>, А.В. Дорофеев<sup>2</sup>, О.В. Бутов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>МФТИ

<sup>2</sup>ИТПЭ РАН

<sup>3</sup>ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

В последнее время большой интерес вызывают особые точки в различных физических системах [1]: в системах взаимодействующих магнанных волноводов [2], в лазерах [3] и т.д. В данной работе предложена система на основе Er/Yb волоконного лазера с двухдефектным резонатором, в которой предсказывается наличие двух особых точек при изменении мощности накачки. Расчёты проведены с учётом реальных параметров волоконной брэгговской решётки и активного волокна на основе Er/Yb.

Изначально зависимость собственных частот системы от входной мощности накачки была рассчитана на основе метода Т-матриц. В области положительных мнимых частей частоты, соответствующей лазерированию, был предсказан эффект особой точки, который предполагается проверить экспериментально. Тем не менее в данной области линейный расчёт с помощью Т-матриц неприменим.

Для того чтобы убедиться в наличии особой точки в нелинейной области, был предложен следующий итерационный подход. Сначала по фиксированному значению мощности накачки, используя метод Т-матриц, находим значение собственных частот и собственные моды системы в линейном приближении, а также нулевое приближение для населённости эрбия. Затем на основе уравнений Максвелла–Блоха и метода связанных мод находим поправку к населённости эрбия, зависящую от времени, вызванную взаимодействием с полем собственных мод лазера

$$\dot{w}_m + \gamma_m w_m = \Omega w_m \int (|a_m|^2 + |b_m|^2) (D_0(z) + \Delta(z, t)) dz / W_m \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \dot{\Delta}(z, t) = & -\gamma_p(z) \Delta(z, t) - \gamma_1 \Delta(z, t) - \\ & -(1+r) \Omega L \sum_m w_m(t) (|a_m(z)|^2 + |b_m(z)|^2) (D_0(z) + \Delta(z, t)). \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь  $w_m$  – интенсивность  $m$ -ой моды,  $a_m(t, z)$ ,  $b_m(t, z)$  – распределение по волокну амплитуд волн, бегущих вправо и влево, для  $m$ -ой моды,  $\Omega$  – параметр связи моды с населённостью,  $\gamma_1$ ,  $\gamma_p$  – скорости релаксации и накачки ионов эрбия,  $D_0(z)$  – начальное распределение населённости эрбия по длине резонатора,  $\Delta(z, t)$  – изменение населённости ионов эрбия под действием поля моды,  $r$  – отношение сечений испускания и поглощения для эрбия,  $L$  – длина резонатора.

Получив из системы уравнений (1), (2) поправку  $\Delta(z,t)$  к значению населённости эрбия, находим новые собственные моды и частоты системы при  $D_0(z) = D_0(z) + \Delta(z,t)$ , после чего снова возвращаемся к решению той же системы. Повторяем этот процесс вплоть до сходимости (пока  $\Delta(z,t)$  не станет меньше фиксированного заранее заданного значения).

Таким образом, с помощью итерационного процесса находится стационарное распределение населённости, соответствующее заданному значению мощности накачки. В свою очередь, зная распределения населённости вдоль волокна, с помощью Т-матриц можно найти значения собственных частот системы.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] M.-A. Miri, A. Alù // Science. – 2019. – V. 363. – No. 6422. – P. eaar7709.
- [2] A.V. Sadovnikov, A.A. Zyablovsky, A.V. Dorofeenko, S.A. Nikitov // Physical Review Applied. – 2022. – V. 18. – No. 2. – P. 024073.
- [3] M. Liertzer, L. Ge, A. Cerjan, et al. // Physical Review Letters. – 2012. – V. 108. – No. 17. – P. 173901.

**ТРИПЛЕТНАЯ СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ И ВОЛНА СПИНОВОЙ  
ПЛОТНОСТИ В ДВУХСЛОЙНОМ АВ ГРАФЕНЕ**  
**А.Л. Рахманов, А.О. Сбойчаков, А.В. Рожков**  
ИТПЭ РАН

Наблюдение моттовского диэлектрического состояния и сверхпроводимости в скрученном двухслойном графене стимулировало дальнейшие исследования коррелированных фаз в двухслойных графеновых системах. Наиболее хорошо изученным типом двухслойного графена является двухслойный графен с АВ упаковкой (AB-BLG). Недавно в легированном AB-BLG наблюдался каскад переходов между несколькими несверхпроводящими и сверхпроводящими состояниями [1,2]. В работе [3] мы показали, что наблюдаемый каскад переходов может быть связан со сменой нескольких дробно-металлических фаз (со спиновой и долинной поляризациями). В данной работе нашей целью является исследование сверхпроводимости в AB-BLG, обусловленной кулоновским отталкиванием.

Мы использовали четырехзонную модель AB-BLG в приближении сильной связи с кулоновским взаимодействием. Перенормированный кулоновский потенциал рассчитывается в рамках приближения случайных фаз (RPA). Гамильтониан модели имеет вид:

$$H_{\text{int}} = \frac{1}{2\mathcal{N}} \sum_{\substack{\mathbf{k}\mathbf{k}'\mathbf{q}\sigma\sigma' \\ i,j\alpha\beta}} d_{\mathbf{k}+\mathbf{q}i\alpha\sigma}^\dagger d_{\mathbf{k}i\alpha\sigma} V_{\mathbf{q}}^{ij} d_{\mathbf{k}'-\mathbf{q}j\beta\sigma'}^\dagger d_{\mathbf{k}'j\beta\sigma'}. \quad (1)$$

Здесь  $d_{\mathbf{k}i\alpha\sigma}$  – операторы вторичного квантования,  $\mathbf{q}, \mathbf{k}$  – импульсы,  $\mathcal{N}$  – число элементарных ячеек,  $\alpha, \beta$  – индексы подрешеток,  $\sigma$  – проекция спина,  $i, j$  – номера слоев,  $V_{\mathbf{q}}^{ij}$  – потенциалы внутрислоевого ( $V_{\mathbf{q}}^{11}, V_{\mathbf{q}}^{22}$ ) и межслоевого ( $V_{\mathbf{q}}^{12}=V_{\mathbf{q}}^{21}$ ) кулоновского взаимодействия. Результаты расчетов показаны на рисунке 1. Важно, что потенциалы  $V_{\mathbf{q}}^{ij}$  растут с ростом  $q$ , если  $q < q_c$ .

Перейдем к базису собственных функций  $\gamma_{\mathbf{k}S\sigma}$  для кинетической части гамильтониана

$$H_0 = \sum_{\mathbf{k}S\sigma} (\varepsilon_{\mathbf{k}}^{(S)} - \mu) \gamma_{\mathbf{k}S\sigma}^\dagger \gamma_{\mathbf{k}S\sigma}. \quad (2)$$

Здесь  $\varepsilon_{\mathbf{k}}^{(S)}$  – собственные энергии,  $S = 1, \dots, 4$ . Анализ показал, что конкурирующими состояниями являются волна спиновой плотности (SDW) и триплетная сверхпроводимость. Упорядочению SDW соответствует ненулевое среднее  $\langle \gamma_{\mathbf{k}3\uparrow}^\dagger \gamma_{\mathbf{k}2\downarrow} \rangle$ , где учтено, что основной вклад в формирование SDW вносят низкоэнергетические зоны  $S = 2$  (дырочная) и  $S = 3$  (электронная). Электронный спектр AB-BLG содержит две долины, соответствующие двум точкам Дирака. Детальный анализ [3] показывает, что существует целый каскад так называемых дробно-металлических фаз, отличающихся поляризацией поверхности Ферми по спину и индексу долины.



Были проанализированы возможные сверхпроводящие (SC) фазы в допированном AB-BLG [4]. Оказалось, что устойчивым является триплетное по спину сверхпроводящее состояние, которому при электронном допировании соответствует ненулевое аномальное среднее  $\langle \gamma_{-k3} \uparrow \gamma_{k3} \downarrow \rangle$  (при дырочном допировании зона 3 заменяется на зону 2).

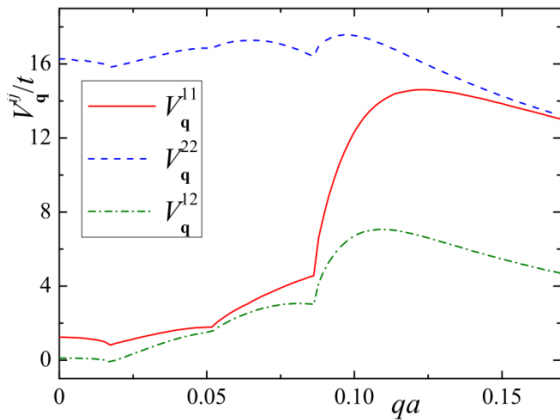


Рисунок 1 – Потенциалы  $V_q^{ij}$ . Затворное напряжение  $e\Phi = 1.2$  eV, допирование соответствует хим. потенциалу  $\mu = 0.0054$  eV.

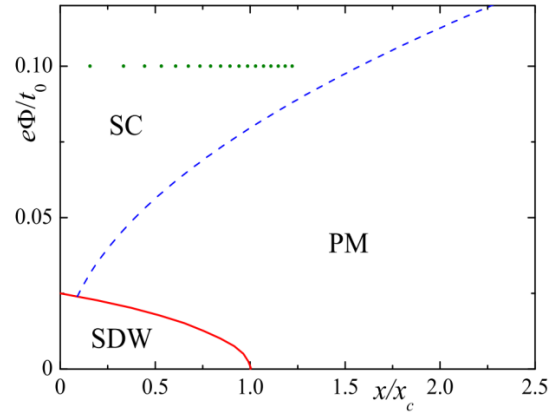


Рисунок 2 – Фазовая диаграмма на плоскости допирование – затворное напряжение. PM – парамагнитное состояние.

Итак, нами выполнены расчеты электронных состояний в двухслойном графене с упаковкой типа AB (фаза Бернала) [3,4]. Проанализирована применимость использованных приближений (в частности, роль флуктуаций). Наши результаты позволяют адекватно (без использования подгоночных параметров и априорных предположений) объяснить каскады фазовых переходов, в том числе переход в сверхпроводящее состояние, которые наблюдались в экспериментах, получить правильные численные оценки температуры сверхпроводящего перехода [2] и величины щели в SDW состоянии [1]. Отметим, что важным является учет отличия межслоевого и внутрислоевого кулоновских взаимодействий. Это отличие является существенным даже в пределе  $qd \ll 1$ , где  $d$  – расстояние между слоями графена. Такое отличие в потенциалах связано с существенно разными условиями экранировки внутрислоевого и межслоевого взаимодействий.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] S.C. de la Barrera et al.// Nat. Phys. – 2022. – V. 18. – P. 771.
- [2] H. Zhou et al.// Science. – 2022. – V 375. – P. 774.
- [3] A.L. Rakhmanov et al.// Phys. Rev. B. – 2023. – V. 107. – P. 155112.
- [4] A.O. Sboychakov et al.// Phys. Rev. B. – 2023. – V. 108. – P. 184503.

# СОСУЩЕСТВОВАНИЕ НЕМАТИЧЕСКОЙ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ И ВОЛНЫ СПИНОВОЙ ПЛОТНОСТИ В ПОДКРУЧЕННОМ ДВУХСЛОЙНОМ ГРАФЕНЕ ПРИ МАГИЧЕСКОМ УГЛЕ ПОДКРУТКИ

А.О. Сбойчаков, А.В. Рожков, А.Л. Рахманов

ИТПЭ РАН

В работе показано [1], что допированный подкрученный двухслойный графен при магическом угле подкрутки может быть сверхпроводящим. В нашем теоретическом сценарии сверхпроводимость сосуществует с упорядочением типа волны спиновой плотности. Численный анализ в приближении среднего поля показывает, что параметр порядка типа волны спиновой плотности, который намного сильнее, чем сверхпроводимость, оставляет часть поверхности Ферми незатронутой. Эта поверхность Ферми служит носителем сверхпроводимости. Поскольку магнитная текстура при конечном допировании нарушает точечную группу подкрученного двухслойного графена [2], стабилизированный сверхпроводящий параметр порядка является нематическим. Мы также исследуем возможность чисто кулоновского механизма сверхпроводимости в исследуемой системе. Экранированное кулоновское взаимодействие рассчитывается в приближении хаотических фаз. Нами было показано, что вблизи половинного заполнения (два электрона или дырки на сверхъячейку) перенормированное кулоновское отталкивание, действительно, индуцирует сверхпроводящее состояние, при этом параметр порядка имеет два узла на поверхности Ферми. Мы оцениваем температуру сверхпроводящего перехода, которая оказывается ниже экспериментально наблюдаемой. Тем не менее, нематичность сверхпроводимости [3], а также несверхпроводящей упорядоченной фазы [4,5] в подкрученном двухслойном графене подтверждаются недавними экспериментами.

Авторы благодарны МСЦ РАН за предоставленные вычислительные ресурсы.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] A.O. Sboychakov et al. // Phys. Rev. B. – 2024. – V.109. – P. 094505.
- [2] A.O. Sboychakov et al. // Phys. Rev. B. – 2020. – V.102. – P. 155142.
- [3] Y. Cao et. al. // Science. – 2021. – V.372. – P. 264.
- [4] Y. Choi et. al. // Nature Physics. – 2019. – V.15. – P. 1174.
- [5] A. Kerelsky et. al. // Nature. – 2019. – V.572. – P. 95.

# НЕТРИВИАЛЬНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ДИРАКОВСКОГО КОНУСА В $\text{Cd}_3\text{As}_2$ С МАГНИТНЫМИ ПРИМЕСЯМИ

Э.Т. Кулатов<sup>1</sup>, Ю.А. Успенский<sup>1</sup>, К.И. Кугель<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФИАН

<sup>2</sup>ИТПЭ РАН

Допирование дираковских полуметаллов нарушает их симметрию относительно обращения времени, что приводит к интересным особенностям их транспортных характеристик. Более того, некоторые проявления линейного закона дисперсии, характерного для конуса Дирака, наблюдались в электронных явлениях переноса в сплавах дираковского полуметалла  $\text{Cd}_3\text{As}_2$  с хромом,  $(\text{Cd}_{1-x}\text{Cr}_x)_3\text{As}_2$  вплоть до  $x=0.06$ . Однако механизм возникновения таких проявлений остаётся пока неясным. Для решения этой задачи мы провели DFT-расчёты сплава  $(\text{Cd}_{0.96}\text{Cr}_{0.04})_3\text{As}_2$  с немагнитным (NM), ферромагнитным (FM) и антиферромагнитным (AFM) упорядочениями спинов в элементарной ячейке. Было обнаружено, что состояние NM обладает наибольшей энергией, а состояние FM – наименьшей. Анализ зонной структуры показал, что  $3d$ -состояния хрома неравномерно распределены по энергии, а именно, в энергетическом спектре имеются «окна», в которых отсутствуют состояния хрома и может сохраняться дираковский спектр. Исключение составляет лишь сама окрестность точки Дирака, где образуется узкая щель. За пределами окна дираковская зона сильно гибридизируется с  $3d$ -состояниями и размывается. Вблизи энергии Ферми такое свободное от Cr окно с дираковской зоной существует только в состоянии  $\text{FM}\downarrow$ , где спин электронов этой зоны противоположен по знаку спину примесей Cr, а в состояниях NM,  $\text{FM}\uparrow$  и AFM оно отсутствует. Поверхность Ферми в FM состоянии состоит из двух частей: дираковского листа с высокой фермиевской скоростью  $v_F$  и нескольких листов с низкой  $v_F$ , связанных с наличием  $3d\uparrow$ -состояний Cr. В качестве примера транспортных свойств была оценена проводимость FM  $(\text{Cd}_{1-x}\text{Cr}_x)_3\text{As}_2$ . Было обнаружено, что для дираковских электронов характерно очень большое транспортное время, и поэтому они доминируют в проводимости. Этот механизм оказывается общим и полезным для дизайна топологических сплавов.

**ОСОБЕННОСТИ МАГНИТОТРАНСПОРТА НАНОКОМПОЗИТНЫХ ПЛЕНОК  
(CoFeV)<sub>x</sub>(LiNbO<sub>3</sub>)<sub>100-x</sub> ВБЛИЗИ ПОРОГА ПЕРКОЛЯЦИИ В УСЛОВИЯХ  
ПРОЯВЛЕНИЯ ОБМЕННЫХ И СО-ТУННЕЛЬНЫХ ЭФФЕКТОВ**

**В.В. Рыльков<sup>1,2</sup>, С.Н. Николаев<sup>2</sup>, К.Ю. Черноглазов<sup>2</sup>, А.В. Ситников<sup>3</sup>,  
А.Н. Талденков<sup>2</sup>, А.Л. Васильев<sup>2</sup>, А.Б. Грановский<sup>1,4</sup>**

<sup>1</sup>ИТПЭ РАН

<sup>2</sup>НИЦ «Курчатовский институт»

<sup>3</sup>ВГТУ

<sup>4</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет

В зависимости от температуры и содержания гранул магнитные наноконпозиты (НК) могут находиться в однодоменном, суперпарамагнитном или неоднородно-магнитном состоянии, сопровождаемом формированием ниже порога перколяции суперферромагнитных (СФМ) областей с межгранульным обменным взаимодействием ФМ-типа [1], которое может значительно усиливаться в НК с высокой диэлектрической проницаемостью матрицы  $\epsilon_d$  из-за ослабления кулоновской блокады [2]. Такого рода объекты представляют интерес как для физики многочастичных взаимодействий, так и для прикладных приложений, поскольку в СФМ состоянии НК обладают рекордно низкой коэрцитивной силой, что делает их перспективными для создания радиопоглощающих покрытий [1, 2]. Однако до сих пор отсутствуют комплексные исследования магнетосопротивления (МС) и аномального эффекта Холла (АЭХ) данных систем, которые могут содержать ценную информацию об их магнитном состоянии и режимах транспорта в условиях проявления СФМ упорядочения.

В работе представлены результаты исследования МС и АЭХ пленочных НК (CoFeV)<sub>x</sub>(LiNbO<sub>3-y</sub>)<sub>100-x</sub> ( $x = 35-60$  ат.%) толщиной 150 нм, синтезированных методом ионно-лучевого распыления составных мишеней на SiO<sub>2</sub>/Si подложки, с акцентом на изучение особенностей, возникающих в окрестности перколяционного перехода ( $x_p \approx 50$  ат.%).

Исследования структурных особенностей НК образцов, выполненные с помощью электронной микроскопии высокого разрешения (микроскоп «Теснаи Osiris», США), показали, что пленки НК представляют собой ансамбль хаотично расположенных CoFeV гранул размером 2–4 нм в аморфной матрице LiNbO<sub>3-y</sub> (для стехиометрического a-LiNbO<sub>3</sub>  $\epsilon_d \sim 50$ ).

Транспортные и магнитные свойства НК изучались на универсальных образцах, полученных с использованием взрывной фотолитографии в форме двойного холловского креста. Эксперименты были выполнены с помощью универсальной измерительной системы PPMS Dynacool-14 в слабых электрических полях  $\leq 10$  В/см, в диапазоне температур  $T = 3-200$  К, в магнитном поле до 14 Тл.

Показано, что для НК с  $x \approx 44\text{--}60$  ат.% в температурной зависимости проводимости наблюдается логарифмический закон  $\sigma \propto \ln T$ , смещающийся с понижением  $x$  в область высоких температур, который при  $x < 44$  ат.% переходит в закон «1/2»  $\ln \sigma \propto -(T_0/T)^{1/2}$ , характерный для со-туннельных процессов переноса в НК [3]. Ниже перколяционного перехода в диапазоне  $T = 3\text{--}250$  К обнаружена сильно немонотонная температурная зависимость МС НК образцов: МС имеет минимум при 40 К, резко возрастая при понижении температуры [4] (рисунок 1(а)). Такое поведение МС объясняется сосуществованием в НК СФМ областей. При этом увеличение отрицательного МС при  $T > 40$  К обусловлено разрушением СФМ упорядочения, а рост МС при  $T < 40$  К связан с процессами упругого со-туннелирования через цепочки гранул. В условиях насыщения намагниченности проявляется дополнительный отрицательный вклад, обусловленный, вероятно, эффектами квантовой интерференции [4].

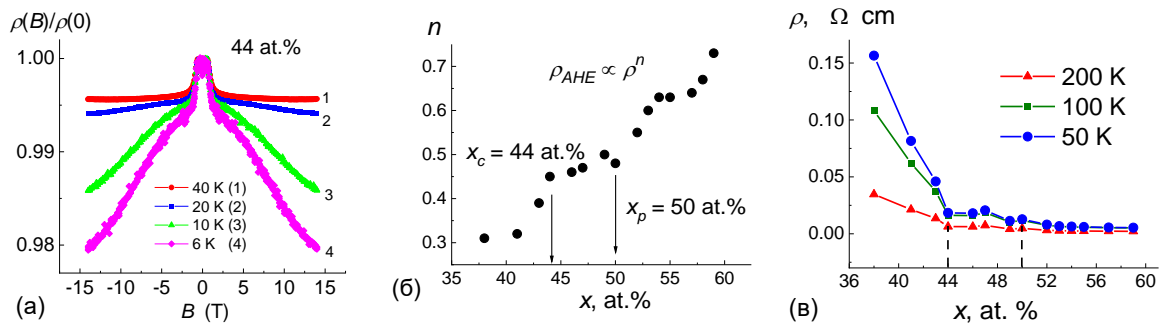


Рисунок 1 – (а) – магнитопольевые зависимости сопротивления при различных температурах,  
 (б) – концентрационная зависимость показателя скейлинга,  
 (в) – концентрационные зависимости сопротивления при различных температурах

Обнаружено, что степень  $n$  в скейлинговой зависимости сопротивления АЭХ,  $\rho_{AHE} \propto \rho^n = (1/\sigma)^n$  ведет себя немонотонно: в диапазонах  $x \approx 35\text{--}44$  ат.% и  $x \approx 50\text{--}60$  ат.% наблюдается явный рост показателя ( $n \approx 0.31\text{--}0.45$  и  $n \approx 0.48\text{--}0.73$  соответственно), а в интервале  $x \approx 44\text{--}50$  ат.% величина  $n$  практически не изменяется ( $n \approx 0.45\text{--}0.48$ ) (рисунок 1(б)). При этом в концентрационном поведении  $\sigma(x)$  область перехода от слабой к экспоненциальной зависимости  $\sigma(x)$  довольно сильно размыта и не содержит ярких особенностей в диапазоне  $x \approx 44\text{--}60$  ат.% (рисунок 1(в)). Мы полагаем, что локальные области изломов в зависимости  $n(x)$  указывают на изменение механизма проводимости НК и определяют порог перколяции ( $x_p \approx 50$  ат.%) и переход металл–диэлектрик ( $x_c \approx 44$  ат.%), которые в данных системах не совпадают. Т.е. определяемый механизмом

АЭХ показатель степени  $n$  гораздо сильнее отражает транспортные особенности НК при изменении его состава, чем вид температурной зависимости сопротивления. Особенности механизма АЭХ ниже порога перколяции связываются с коррелированным изменением вероятности со-туннельных переходов в совокупности из более 3-х центров под действием спин-орбитального взаимодействия [5].

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 22-19-00171.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] S. Bedanta, W. Kleemann // J. Phys. D. – 2009. – V.42. – P. 013001.
- [2] O.G. Udalov, I.S. Beloborodov // Phys. Rev. B. – 2017. – V.95. – P. 045427.
- [3] M.V. Feigel'man, A.S. Ioselevich // JETP Lett. – 2005. – V.81. – P. 227.
- [4] С.Н. Николаев и др. // Письма в ЖЭТФ. – 2023. – Т.118. – С. 46.
- [5] С.Н. Николаев и др. // Письма в ЖЭТФ. – 2023. – Т. 118. – С. 519.

**АНИЗОТРОПНОЕ МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЕ ВЕЙЛЕВСКИХ  
ПОЛУМЕТАЛЛОВ В СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ**  
А.Ш. Дотдаев<sup>1</sup>, Я.И. Родионов<sup>2</sup>, К.И. Кугель<sup>2</sup>, Б.А. Аронзон<sup>3</sup>

<sup>1</sup>НИТУ МИСИС

<sup>2</sup>ИТПЭ РАН

<sup>3</sup>ФИАН

Изучается влияние анизотропии на магнитосопротивление вейлевских полуметаллов в ультраквантовом режиме. Многие вейлевские полуметаллы имеют квазичастичный спектр с выраженной аксиальной анизотропией. Мы показываем, что указанная анизотропия проявляет себя в сильной зависимости магнитосопротивления от полярного и азимутального углов, определяющих ориентацию оси анизотропии относительно приложенного магнитного поля и электрического тока. Мы также предсказываем, что отношение магнитосопротивлений в геометриях, где оси магнитного поля и анизотропии совпадают и где они ортогональны, масштабируются как  $(v_{\perp}/v_{\parallel})^2$ , где  $v_{\perp}$  и  $v_{\parallel}$  – соответствующие скорости Ферми.

Геометрия задачи представлена на рисунке 1(а). Ось анизотропии ( $\mathbf{n}_0$ ) наклонена под полярным углом  $\Theta$  и азимутальным углом  $\Phi$ .

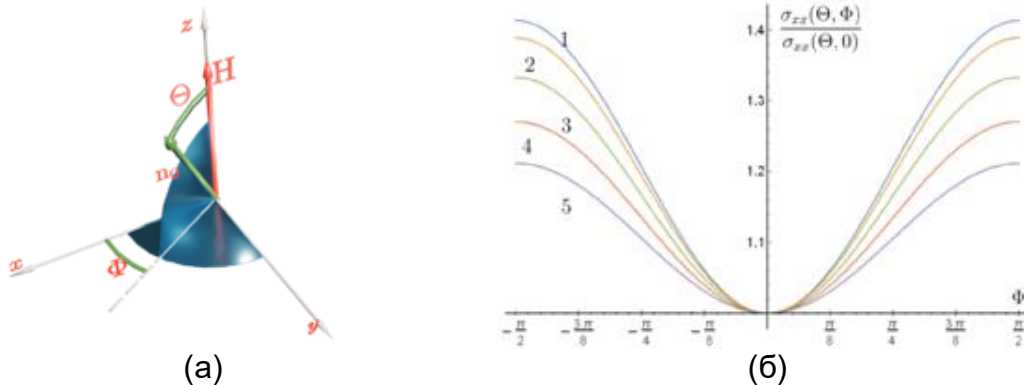


Рисунок 1 – (а) геометрия задачи, (б) угловая зависимость  $\sigma_{xx}$

Главный результат состоит в полученной нами формуле проводимости [1]

$$\sigma_{xx} = \frac{\alpha^3}{\Omega^2} v_{\parallel}^3 n_{\text{imp}} [\cos^2 \Theta + \xi^{-2} \sin^2 \Theta] \ln \frac{1}{\alpha}, \quad (1)$$

где  $\Omega^2 = 2eHv_{\parallel}/c$  – циклотронная частота,  $H$  – магнитное поле,  $\alpha = e^2/(\hbar v_{\parallel}) \ll 1$  – параметр разложения теории возмущений и  $v_{\perp} = \xi v_{\parallel}$ . График зависимости проводимости  $\sigma_{xx}$  представлен на рисунке 1(б).

### ЛИТЕРАТУРА

[1] A.S. Dotdaev, Ya.I. Rodionov, K.I. Kugel, B.A. Aronzon // Phys. Rev. B. – 2023. – V. 108. – P. 16512.

# УСТРАНЕНИЕ ОШИБОК КВАНТОВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОГО УРОВНЯ ШУМА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЛУБОКИХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

**А.А. Жуков<sup>1</sup>, В.В. Погосов<sup>1,2,3</sup>**

<sup>1</sup>ФГУП «ВНИИА» им.Н.Л. Духова

<sup>2</sup>ИТПЭ РАН

<sup>3</sup>МФТИ

Современные квантовые компьютеры характеризуются высоким уровнем шума, который пока не позволяет реализовать отказоустойчивые квантовые вычисления. Кроме того, доступное количество кубитов в квантовых устройствах недостаточно велико для достижения этой цели. Такие квантовые компьютеры относятся к классу шумных квантовых машин промежуточного масштаба (NISQ), производительность которых ограничена. Тем не менее недавно полезность квантовых вычислений без обеспечения отказоустойчивости была продемонстрирована с помощью сверхпроводящего квантового компьютера, использующего технику квантового смягчения ошибок [1].

Для улучшения производительности NISQ-устройств были разработаны различные схемы квантового смягчения ошибок. Однако большинство широко распространенных практических методов не столь эффективны в режимах сильного шума, когда матожидания ограниченных бесследовых наблюдаемых стремятся к нулю. В частности, популярная экстраполяция к нулевому шуму основана на сборе данных при различных уровнях шума (параметрах шума), которые могут быть искусственно увеличены сверх базового уровня путем растягивания длительности импульса, используемого для квантовых гейтов, или путем введения в схему шумящих идентичных гейтов и экстраполяции результата к уровню нулевого шума. Такой подход сталкивается с проблемой неопределенности экстраполяции в режимах высокого шума.

Недавно мы предложили основанный на обучении метод подавления квантовых ошибок, который использует глубокую нейронную сеть на этапе постобработки [2]. Подход может быть применен к квантовым схемам с повторяющимися слоями гейтов, например, к схемам для троттеризованного квантового моделирования. Основная идея заключается в обучении квантовой сети для меньшего числа шагов Троттера  $N_1$  по сравнению с тем же числом  $N_2$  в интересующей нас целевой схеме, т.е. обучение проводится для более короткой схемы, для которой известен результат. Данные для обучения могут быть получены либо из того же квантового компьютера, поскольку в этом случае они будут



менее зашумлены по сравнению с данными, полученными из целевой схемы. Заметим, что качество данных можно дополнительно улучшить прямой экстраполяцией к нулевому шуму. Другая возможность – использовать классические методы моделирования, такие как тензорные сетевые подходы, чтобы получить данные для максимально возможного числа шагов Троттера. Для обучающей схемы  $N_1$  шагов Троттера для общего времени эволюции  $T$  дополнены шумящими гейтами идентичности, каждый из которых представлен  $N_2 - N_1$  «пустыми» слоями Троттера, из которых удалены все вращения. Уровень шума, а также структура схемы в случае такой комбинированной схемы имитируют таковые для интересующей нас целевой схемы, состоящей из  $N_2$  шагов Троттера за то же общее время эволюции  $T$ . Преимущество метода заключается в том, что нет необходимости усиливать шум для глубоких схем, для которых наблюдаемые параметры уже сильно подавлены.

Целью настоящей работы является исследование эффективности подхода, предложенного в работе [2] для различных квантовых шумов. В частности, рассматривается [3] деполяризующий канал, неоднородный шум Паули, а также ZZ перекрестные шумы, последние из которых особенно вредны для сверхпроводящих кубитов с фиксированной частотой. В качестве эталона рассматривается двумерная спиновая решетка, описываемая гамильтонианом Изинга в поперечном поле. Наблюдается резкое улучшение качества данных с помощью нашего метода для всех шумовых каналов, кроме шума перекрестных связей. В частности, для некогерентных ошибок качество улучшения существенно ограничивается лишь статистическими неопределенностями, обусловленными вероятностным характером измерений (статистический шум). Этот вывод сделан для локальных наблюдаемых как с весом 1, так и с весом 2. На практике целесообразно сочетать наш метод с рандомизированной компиляцией, которая позволяет переводить шум перекрестных помех, как и любой другой когерентный шум, в деполяризующий шум.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Y. Kim et al. // Nature. – 2023. – V.618. – P. 500.
- [2] A. A. Zhukov, W. V. Pogosov // Quant. Inf. Proc. – 2022. – V.21. – P. 1.
- [3] A. A. Zhukov, W. V. Pogosov // Quant. Inf. Proc. – 2024. – V.23. – P. 80.

## **ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ АНИЗОТРОПИИ НА СВОЙСТВА ТОНКОСЛОЙНЫХ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ**

**В.Н. Кисель, А.И. Игнатов, А.Н. Лагарьков**

ИТПЭ РАН

В ИТПЭ РАН активно ведутся работы над созданием и совершенствованием радиопоглощающих материалов, на основе которых можно было бы создавать тонкие и легкие радиопоглощающие покрытия (РПП), предназначенные для работы в низкочастотной части диапазона СВЧ (сотни МГц – единицы ГГц). Наряду с традиционно используемыми радиопоглощающими материалами с наполнителями на основе модифицированного карбонильного железа, для работы в составе этих покрытий разрабатываются и перспективные материалы, поглощающие свойства которых обеспечиваются, в основном, магнитными потерями в тонких наноструктурированных металлических пленках или их фрагментах (осколках). Важной особенностью таких материалов является анизотропия свойств: радиофизические параметры покрытий существенно различаются в направлениях вдоль и перпендикулярно подложке. В докладе анализируется влияние параметров анизотропии на показатели поглощения электромагнитной энергии и делается вывод, что при использовании электрически тонких, хорошо поглощающих покрытий определяющую роль играют компоненты тензора диэлектрической и магнитной проницаемостей, измеренные вдоль подложки, например, в условиях падения плоской электромагнитной волны по нормали к плоскости, покрытой РПП. В то же время с увеличением электрической толщины РПП (с повышением частоты) при невысоком уровне электромагнитных потерь в покрытии справедливость этого утверждения нарушается, и нужно использовать строгое решение граничной задачи для многослойной среды. Критерием применимости упрощенного подхода является возможность использования импедансного приближения для описания характеристик РПП, что проявляется в практически постоянном значении поверхностного импеданса независимо от угла падения плоской электромагнитной волны на бесконечную металлическую плоскость с покрытием.

# ПРИБЛИЖЁННЫЕ КРАЕВЫЕ УСЛОВИЯ НА ГРАНИЦЕ КЛИНА ВЫСОКОЙ ПРОВОДИМОСТИ

М.М. Шушарин<sup>1</sup>, И.Е. Могилевский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ИТПЭ РАН

<sup>2</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет, каф. математики

При моделировании рассеяния электромагнитных волн на телах конечной проводимости точность граничных условий для идеального проводника часто оказывается недостаточной. В таких случаях требуется расчёт поля во внутренней области, что приводит к усложнению вычислений. Однако если проводимость конечна, но всё же достаточно велика, то для тел с гладкой границей можно применить приближённые граничные условия Щукина–Леонтовича, также называемые импедансными, полученные российскими физиками М.А. Леонтовичем и А.Н. Щукиным.

Их результаты развиты в диссертации О.И. Паньча [1], где кривизна боковых поверхностей учитывается в старших порядках малости приближённых граничных условий. Однако при наличии ребра на поверхности соприкосновения проводника с диэлектриком нарушаются условия применимости, для которых изначально выводились импедансные граничные условия.

В данной работе путём модификации метода, предложенного О.И. Паньчем, выведены приближённые граничные условия для задачи, в которой граница проводника содержит ребро. Рассмотрена задача дифракции гармонической плоской волны на клине для ТМ-поляризации при постоянной магнитной проницаемости  $\mu = 1$  как вне цилиндра, так и внутри него. Исследуется именно этот частный случай, так как для него решение не имеет сингулярности в окрестности ребра [2], что позволяет получить соответствующее асимптотическое представление.

## ЛИТЕРАТУРА

[1] О.И. Паньч О приближённых краевых условиях в задачах дифракции // Дис. канд. ф.-м. наук, МГУ им. М.В.Ломоносова, Физический факультет, кафедра математики. – Москва: 1951.

[2] А.Н. Боголюбов, И.Е. Могилевский, М.М. Шушарин Задачи электромагнитной дифракции на телах сложной формы при различных типах граничных условий // Ломоносовские чтения 2023. Секция физики. – 2023. – С. 111–112.

## РАДИОТЕХНИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАДИОПРОЗРАЧНЫХ ОБТЕКАТЕЛЕЙ ИЗ СТЕКЛОПЛАСТИКА

К.М. Басков, В.Н. Семенов, И.И. Краснолобов, В.А. Чистяев

ИТПЭ РАН

Бортовые антенные системы на летательных аппаратах не могут использоваться без радиопрозрачных обтекателей (РПО). При этом РПО существенным образом влияют на радиотехнические характеристики (РТХ) антенн, которых они защищают. Уже давно были разработаны теоретические основы по проектированию и созданию РПО. Основным учебником по созданию РПО является работа второй половины 20 века [1] В.А. Каплуна. В то время при проектировании РПО специалисты пользовались несовершенными как вычислительными, так и измерительными средствами, поэтому работа по проектированию РПО была достаточно трудоёмкой, а в конечном итоге расчётное радиотехническое качество РПО в реальном обтекателе часто не достигалось. Настоящая работа посвящена описанию основных этапов современного проектирования РПО от выбора конструкции его стенки до контроля технологии производства с использованием современной вычислительной и измерительной техники.

Радиотехническое проектирование РПО состоит из трёх этапов. На первом этапе проводится численный анализ системы антенна–РПО. Любое проектирование РПО необходимо начинать с анализа условий прохождения электромагнитной волны (ЭМВ) излучения антенны через его стенку, а именно, необходимо определить, под какими углами и при какой поляризации ЭМВ на неё падает. Анализ углов падения и поляризации ЭМВ заключается в расчёте распределения мощности излучения антенны по углам падения и по поляризации для каждого направления сканирования. Используя результаты анализа условий прохождения ЭМВ через стенку РПО и учитывая возможности технологии производства, осуществляется выбор конструкции стенки, а также проводится вычисление оптимальных её параметров, которые позволят добиться максимального радиотехнического качества РПО.

Далее на первом этапе проводится расчёт РТХ РПО с вычисленными оптимальными параметрами стенки. Существует достаточно большое количество методик расчёта РТХ РПО, но, как показала практика, наиболее подходящей из них является методика, описанная в [2]. Результаты расчётов позволяют определить проблемные моменты, которые по возможности необходимо решить с помощью дополнительных элементов конструкции, включаемых в РПО. Такими конструкциями могут быть компенсационные слои в стенке РПО, а также различные вставки. Дополнительные элементы

в РПО позволяют улучшать различные его РТХ. Например, компенсационный слой позволяет уменьшить ошибки пеленга, связанные с РПО [3]. Диэлектрические вставки в некоторых зонах РПО позволяют выравнивать фронт ЭМВ излучения антенны и компенсировать искажения её диаграммы направленности, связанные с РПО. Именно на первом этапе необходимо заложить в конструкцию РПО эти дополнительные элементы, чтобы на следующих этапах отработать их конфигурацию. На примере численного анализа двух вариантов РПО в работе будут показаны подходы, которые на первом этапе позволяют определить облик РПО с максимально достижимым радиотехническим качеством.

На втором этапе необходимо провести отработку технологии производства стенки РПО. Так как конструкция стенки РПО и параметры её слоёв определены на первом этапе, на втором этапе необходимо наладить технологию изготовления стенки РПО таким образом, чтобы реальные электродинамические параметры её слоёв были максимально приближены к расчётным параметрам. В [4] был описан стенд для измерения радиофизических параметров материалов, а также для измерения S-параметров образцов различных материалов и конструкций. Для отработки технологии производства стенки РПО лучше всего подходит именно подобный стенд. С помощью стенда на втором этапе определяются реальные электродинамические параметры стенки РПО по нескольким плоским образцам стенки. В докладе на примере разработки стенки РПО для антенны с широким рабочим диапазоном частот с центральной частотой 12 ГГц при углах падения до  $70^\circ$  будут представлены результаты измерений, а также их анализ для разработки технологии производства.

Третий этап проектирования РПО заключается в натурных испытаниях РТХ опытного образца РПО. Это самый трудоёмкий и дорогостоящий этап, так как требует создания рабочего места и использования сложного измерительного оборудования для измерений характеристик излучения антенны с установленным перед ней РПО.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] В.А. Каплун Обтекатели антенн СВЧ. – М.: Советское радио, 1974. – 240 с.
- [2] К.М. Басков, А.И. Федоренко // Журнал радиоэлектроники. – 2016. – №2. – С. 16.
- [3] К.М. Басков и др. // Радиотехника и электроника. – 2022. – № 3. – Т. 67. – С. 244–248.
- [4] В.Н. Семенов и др. // Измерительная техника. – 2019. – № 2 – С. 55–59.

## **ОЦЕНКА МИНИМАЛЬНЫХ И МАКСИМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ РАССЕЯНИЯ УЗКИМИ ПОЛЫМИ ЩЕЛЯМИ**

**К.М. Басков, И.И. Краснолобов, А.М. Лебедев,**

**В.Н. Семененко, Т.А. Фурманова**

**ИТПЭ РАН**

Оценка интенсивности рассеяния электромагнитных волн щелями в поверхностях металлических элементов необходима при анализе характеристик рассеяния электромагнитных волн объектами, поскольку разного рода щели присутствуют практически во всех конструкциях. В частности, щели могут быть в виде канавок по местам стыков листов металлической обшивки либо в виде сквозных зазоров по краям технологических отверстий. Отметим, что подавляющее большинство щелей являются узкими и длинными для волн от сантиметрового до метрового диапазонов, обычно используемых в радиолокации. С методической точки зрения полые щели в плоской поверхности металлического объекта принадлежат к классу канонических рассеивателей, таких как металлические сфера, цилиндр, клин, прямоугольная пластина. Однако необходимые аналитические выражения для расчётов интенсивности рассеяния щелями, а тем более для оценки минимальных и максимальных значений интенсивности рассеяния отсутствуют в технической литературе и известных справочниках [1,2].

В данной работе в предположении справедливости одномодового приближения поле внутри щелей представлялось как встречное движение ТЕМ-волн и определялось через постоянные составляющие падающего и рассеянного полей в отверстиях щелей. Полагалось также, что в поперечных сечениях по длине щелей сохраняется двумерное, как при рассеянии на бесконечной щели, распределение полей и токов. Экспериментальная проверка показала справедливость сделанных предположений. В частности, вычисления по полученным формулам точны вплоть до ширины щелей, равной половине длины волны – для более широких щелей одномодовое приближение теряет справедливость.

Основываясь на разработанной процедуре вычисления адмиттанса внешней области, примыкающей ко входу в щель, были получены зависимости интенсивности двухпозиционного и обратного рассеяния полыми, прямыми и узкими по сравнению с длиной волны щелями в виде канавок либо сквозных зазоров в локально плоской поверхности металлического объекта от ширины и глубины щелей. Учёт адмиттанса внешней области в расчётах позволил получить высокую точность вычисления полей рассеяния, в том числе в окрестности минимумов

и максимумов интенсивности рассеяния канавкой. Исходя из аналитических выражений для интенсивности рассеяния, получены оценочные формулы для эффективной поверхности рассеяния канавок в области её минимальных и максимальных значений. Показано, что в области минимальных значений эффективная поверхность рассеяния узких канавок сильно зависит от частоты, а также от ширины и глубины канавки, вид этой зависимости выявлен. Наоборот, высота максимумов эффективной поверхности рассеяния узкими канавками оценивается как  $16/\pi \approx 5$  м<sup>2</sup> на метр длины и в первом приближении не зависит от частоты, ширины и глубины канавки. Проверка подтвердила, что максимумы рассеяния канавками достигаются при резонансах стоячей волны внутри канавки. Было выполнено тестирование полученных выражений для минимальных и максимальных значений интенсивности рассеяния щелями путём сравнения с результатами измерений в безэховой камере и с помощью расчётов рассеяния щелями методом поверхностных интегральных уравнений.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] В.О. Кобак Радиолокационные отражатели. – М.: Советское радио, 1975. – 248 с.
- [2] E.F. Knott, J.F. Shaeffer, M.T. Tuley Radar Cross Section // Scitech Publishing Inc. – 2004.

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ РУПОРНОЙ КОНИЧЕСКОЙ БЕЗЭХОВОЙ КАМЕРЫ С ЛИНЗОВЫМ ОБЪЕКТИВОМ

Н.П. Балабуха<sup>1</sup>, Н.Л. Меньших<sup>1</sup>, А.Д. Сахно<sup>2</sup>, Н.Е. Шапкина<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ИТПЭ РАН

<sup>2</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет, каф. математики

Рассмотрено распределение электромагнитного поля в рабочей зоне рупорной безэховой камеры (РБЭК) конического типа при использовании системы линз для коррекции фазы поля в рабочей зоне. Формирование поля в РБЭК с одной собирающей линзой исследовалось в работах [1–2], где было показано существенное расширение размеров рабочей зоны на частотах выше 500 МГц за счет коррекции фазы линзой.

Для оценки характеристик РБЭК использовался пакет для электродинамического моделирования FEKO, позволяющий проводить расчеты с помощью метода моментов. Расчеты проводились на частотах 500 и 800 МГц. Исследуемая РБЭК имеет угол раскрыва 33,4°. Длина рупорной части конической камеры составляет 16,3 м. В модели внешние поверхности камеры идеально проводящие, внутренние поверхности покрыты радиопоглощающим материалом, моделируемым слоем диэлектрика с заданными параметрами ( $\varepsilon = 1,54 + 1,39i$  для частоты 500 МГц и  $\varepsilon = 1,37 + 0,65i$  для частоты 800 МГц) и постоянной толщиной 300 мм.

На рисунке 1 представлена исследуемая система линз в РБЭК.

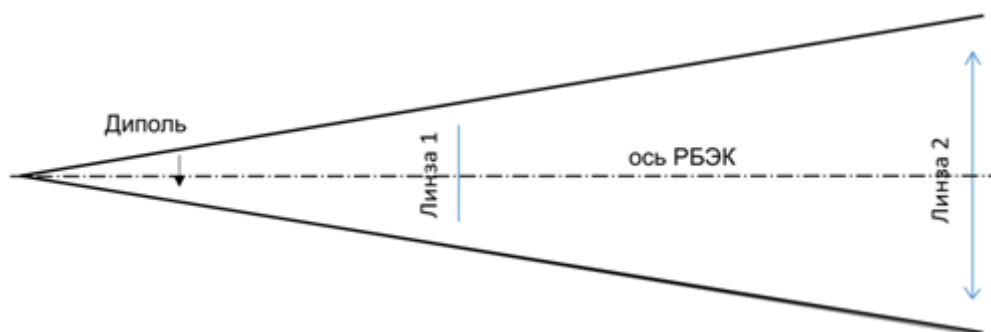


Рисунок 1 – Расположение линз в модели

Оси обеих линз совпадают с осью РБЭК (см. рисунок 1). Варьируются положение и параметры линзы 1. Рассматриваются конфигурации с собирающей и рассеивающей линзой 1, причем подбирается оптимальное фокусное расстояние для выбранного положения линзы. Также рассматриваются модели с различными фокусными расстояниями линзы 2.



Во всех моделях применялись гиперболические линзы с одной преломляющей поверхностью как наиболее простые в изготовлении. Материал линзы является однородным диэлектриком с  $\varepsilon = 1,6$ .

Задача моделирования формирования поля в полноразмерной РБЭК является очень ресурсоемкой. Поэтому в данной работе было предложено несколько упрощений. Предполагается, что обе линзы находятся в свободном пространстве, а на них падает электромагнитное поле, заданное на плоскости перед линзой 1. Предварительно это поле было рассчитано в рупорной части камеры без линзы, причем ранее было показано [3], что предложенный метод пересчета мало влияет на погрешность расчетов.

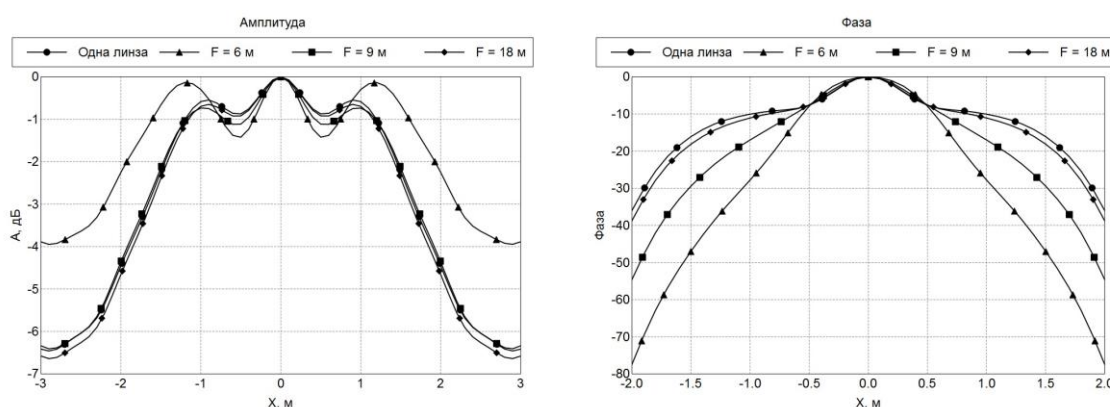


Рисунок 2 – Электромагнитное поле в центре рабочей зоны при использовании рассеивающей и собирающей линз на частоте 500 МГц

Было показано, что на частоте 500 МГц рассеивающая линза 1 не позволяет получить увеличения размеров рабочей зоны по сравнению со случаем использования одной линзы (см. рисунок 2). При использовании собирающей линзы 2 была проведена оптимизация фокусного расстояния линзы 1 (с ограничением в 20 м). Моделирование показало, что наилучшее фокусное расстояние данной линзы оказалось равным 20 м, а размер рабочей зоны не увеличился по сравнению с вариантом использования одной линзы.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] N.P. Balabukha, N.L. Men'shikh, and N.E. Shapkina // Moscow University Physics Bulletin. – 2021. – V. 76. – No. 3. – P. 126–135.
- [2] N.P. Balabuha, N.L. Menshikh, A.D. Sakhno and N.E. Shapkina // Photonics and Electromagnetics Research Symposium (PIERS). – 2021. – P. 2552–2561.
- [3] Н.П. Балабуха, Н.Л. Меньших, В.С. Солосин // Антенны. – 2015. – Т. 220. – № 9. – С.61.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛЯ, СФОРМИРОВАННОГО ПЛОСКОЙ ЛИНЗОЙ В МОДЕЛИ РУПОРНОЙ КАМЕРЫ

Д.П. Королев<sup>1,2</sup>, В.С. Солосин<sup>1</sup>, Н.Л. Меньших<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИТПЭ РАН

<sup>2</sup>МФТИ

В плоской линзе диэлектрическая проницаемость меняется от центра к краю по закону, задаваемому обобщённой формулой Микаэляна [1], за счёт чего линза способна фокусировать падающий на неё пучок. Такая линза может быть использована в качестве коллиматора в рупорной безэховой камере [2]. В данной работе мы экспериментально исследуем разработанную ранее плоскую линзу. Изменение коэффициента преломления в зависимости от радиуса было реализовано при помощи вариации параметров структуры линзы, представляющей собой квадратные ячейки с квадратными отверстиями. Меняя размер отверстия, можно достичь любого необходимого значения эффективной диэлектрической проницаемости. Модель выполнена в масштабе 1:22, линза имеет диаметр 20 см и фокусное расстояние 80 см. Экспериментальная установка показана на рисунке 1.



Рисунок 1 – Фото экспериментальной установки:  
(а) – вид сбоку, (б) – вид спереди

Измерения распределения поля в рабочей зоне камеры проводились с помощью сканера в диапазоне частот от 8 до 12 ГГц. Результаты сканирования поля на расстоянии 20 см от апертуры рупорной части камеры с установленной линзой и без неё представлены на рисунке 2.

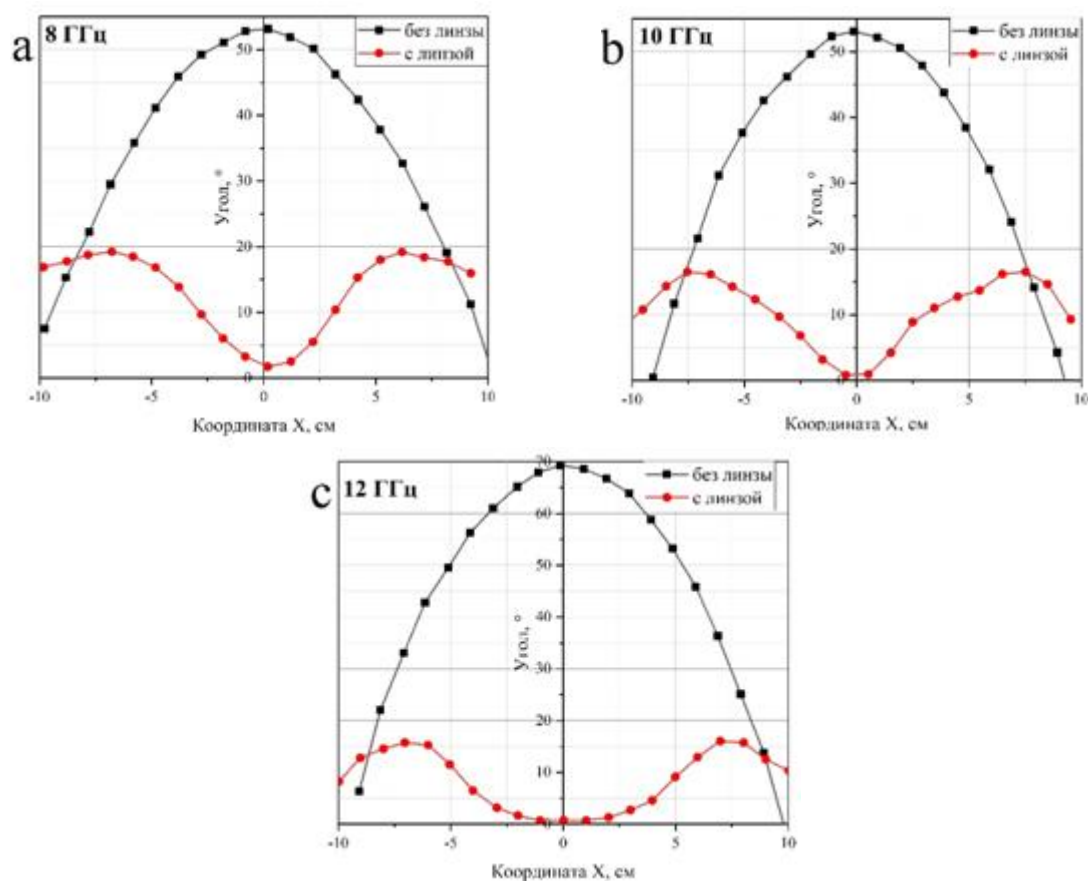


Рисунок 2 – Сравнение распределений фазы поля, сформированного плоской линзой, и поля без линзы для частот: (а) – 8 ГГц, (б) – 10 ГГц, (с) – 12 ГГц

Из графиков, приведенных на рисунке 2, видно, что для всех представленных частот неравномерность фазы при использовании линзы составила менее  $20^\circ$ , что удовлетворяет критерию для рабочей зоны [3]. Таким образом, линза может быть использована в качестве коллиматора для РБЭК в исследованном диапазоне частот.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Е.А. Зелкин, Р.А. Петрова, Линзовые антенны. – М.: Советское радио, 1974.
- [2] Н.П. Балабуха, Н.Л. Меньших, В.С. Солосин Исследование формирования поля в рупорной безэховой камере с плоской линзой // Сборник трудов XXXIII Всероссийской школы-семинара «Волновые явления: физика и применения» имени А.П. Сухорукова («Волны-2022») (ISBN 978-5-6045125-2-4) Математическое моделирование в задачах волновой физики. – С. 2–4.
- [3] Н.П. Балабуха, А.С. Зубов, В.С. Солосин, Компактные полигоны для измерения характеристик рассеяния объектов. – М.: Наука, 2007.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУЧЕНИЯ ДВУХПОЗИЦИОННОЙ ЭПР ОБЪЕКТА ПРИ ПОМОЩИ СКАНИРОВАНИЯ НА ПЛОСКОСТИ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ

Д.А. Коняев<sup>1,2</sup>, Н.П. Балабуха<sup>1</sup>, Н.Е. Шапкина<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ИТПЭ РАН

<sup>2</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет, каф. математики

Получение радиолокационных характеристик объектов является актуальной задачей [1]. Одной из основных характеристик изучаемых объектов является диаграмма ЭПР [1]. Часто наряду с однопозиционными ЭПР требуется получать двухпозиционные ЭПР [2], [3]. Для измерения двухпозиционных ЭПР тел больших размеров (по сравнению с размерами камеры и длины волны) можно использовать сканер, предназначенный для измерения поля в ближней зоне с последующим расчетом на основе этих измерений поля в дальней зоне [1]–[4]. При этом возникает необходимость измерять рассеянное поле в сравнительно большом наборе точек пространства, что требует больших затрат времени на измерения. В связи с этим важен вопрос о выборе минимального набора точек, по которому можно рассчитать искомую характеристику с приемлемой точностью.

В работе рассматривается метод получения двухпозиционной ЭПР посредством сканирования в ближней зоне на плоскости [4]. Исследуется вопрос снижения затрат на измерения при условии, что требуется отыскать двухпозиционные ЭПР объекта лишь в сечении горизонтальной плоскостью (горизонтальная плоскость – плоскость  $XOZ$ ). Рассматривается конфигурация, параметры сканера которой соответствуют предполагаемому сканеру в разрабатываемом компактном полигоне. Конфигурация рассматриваемой модельной задачи представлена на рисунке 1.

Основным методом пересчёта поля из ближней зоны в дальнюю при сканировании на плоскости является метод, который состоит в разложении рассеянного электромагнитного поля по базису, состоящему из плоских волн, с дальнейшим расчётом поля в дальней зоне по асимптотическим формулам. При необходимости можно применить компенсацию влияния приёмной антенны (зонда) [4].

Пусть рассеивателем является идеально проводящий цилиндр радиуса  $R_{cyl} = 2\lambda \approx 0.60$  м и высоты  $H_{cyl} = 8\lambda \approx 2.40$  м. На него падает горизонтально поляризованная плоская волна частотой 1 ГГц (вектор напряжённости электрического поля коллинеарен с осью  $OZ$ ). Поверхность сканирования – прямоугольник шириной 32 м и максимальной высотой 16 м, лежащий в плоскости, параллельной плоскости  $XOY$ , расположенной на расстоянии 11 м от центра рассеивателя. Эталонные значения ЭПР, а также поле в ближней зоне были рассчитаны при помощи FEKO.

Исследовалась ошибка расчёта сечения двухпозиционной ЭПР в плоскости XOZ в зависимости от высоты сканирования – размера прямоугольника сканирования вдоль оси OY. Для этого последовательно увеличивалось число линий сканирования вдоль оси OX. Полученные ЭПР сравнивались с эталонной ЭПР и с ЭПР, полученной с максимальным доступным числом линий (высота сканирования 16 м). Наиболее интересные численные результаты представлены на рисунке 2.

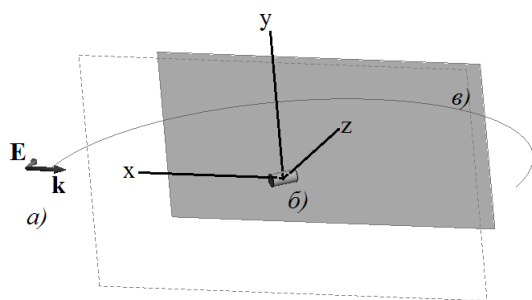


Рисунок 1 – Конфигурация рассматриваемой задачи:  
 а) падающая волна;  
 б) рассеиватель;  
 в) поверхность сканирования

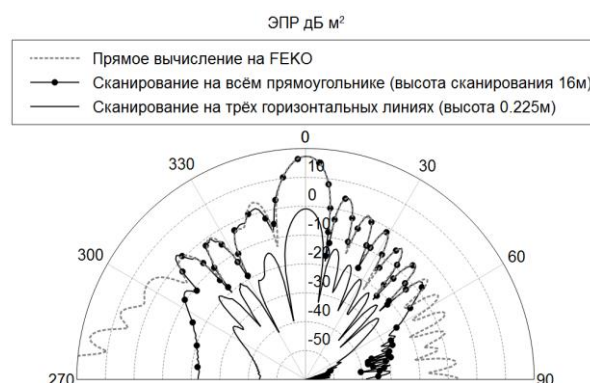


Рисунок 2 – Сравнение результатов расчёта сечения двухпозиционной ЭПР плоскостью XOZ при сканировании в ближней зоне на плоскости

Из рисунка 2 видно, что даже при сканировании с использованием всего трёх шагов вдоль оси OY сечение получаемой двухпозиционной ЭПР хорошо качественно передаёт сечение искомой ЭПР. При этом из рисунка 2 можно заключить, что нормированные ЭПР будут хорошо согласовываться. Отсюда можно сделать вывод, что при получении горизонтального сечения двухпозиционной ЭПР можно пробовать ограничиться минимальным количеством шагов по вертикали при сканировании.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Н.П. Балабуха, А.С. Зубов, В.С. Солосин Компактные полигоны для измерения характеристик рассеяния объектов. – М.: Наука, 2007 – 266 с.
- [2] R.A. Marr, et al. // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2006. – V. 54. – No. 12. – С. 3857–3864.
- [3] К.Т. Kim // IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI). – 2011. – С. 2138–2141.
- [4] G.K. Huddleston Optimum Probes for Near-Field Antenna Measurements on a Plane : дисс. – Georgia Institute of Technology, 1978.

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТРЕХМЕРНОГО ЗЕРКАЛЬНОГО КОЛЛИМАТОРА СО СГЛАЖЕННЫМИ СКРУГЛЕННЫМИ КРАЯМИ

М.И. Пропой<sup>1</sup>, Ф.Б. Хлебников<sup>1</sup>, Д.А. Коняев<sup>1,2</sup>,  
Н.Е. Шапкина<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет, каф. математики

<sup>2</sup>ИТПЭ РАН

Одним из основных элементов компактного полигона является коллиматор, создающий электромагнитное поле, близкое к полю плоской волны в выделенной области пространства, называемой рабочей зоной. Авторами был смоделирован трехмерный идеально проводящий зеркальный коллиматор для одной из безэховых камер ИТПЭ РАН. Исходя из размеров камеры и расположения центра рабочей зоны, были рассчитаны геометрические характеристики коллиматора, расположение его центра в камере, проведена оптимизация скругленных краев его вертикального и горизонтального сечений на основе дуг эллипсов в соответствии с процедурой, представленной в работе [1].

Модель коллиматора была построена в соответствии с алгоритмом, представленным в статье [2], с дополнительной модификацией формы углов коллиматора для уменьшения дифракционных эффектов на них. Проектирование коллиматора было осуществлено в программных средах Altair FEKO и AutoCAD 2021, т. к. предполагается дальнейшее изготовление зеркала на фрезерном станке.

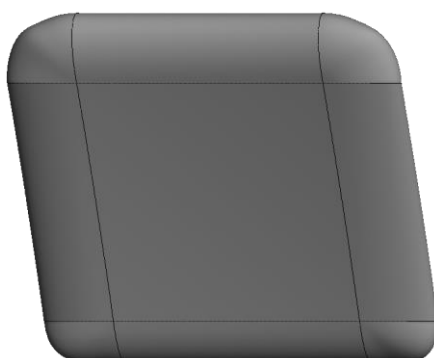


Рисунок 1 – Трехмерный зеркальный коллиматор  
с фокусным расстоянием  $F = 4.2$  м, полуосями эллипсов  $a_{\text{horiz}} = 0.39$  м,  
 $b_{\text{horiz}} = 0.12$  м,  $a_{\text{vert}} = 0.31$  м,  $b_{\text{vert}} = 0.15$  м

Для рассматриваемой модели вводится система координат, ось  $x$  которой направлена вдоль оси вращения параболоида, вырез которого является основой коллиматора, и ставится краевая задача дифракции электромагнитных волн во всем трехмерном пространстве, которая сводится к численному решению уравнения (1) методом моментов [3]:

$$\frac{i}{4\pi} \left[ \left( \omega \int_S \mathbf{J}(\mathbf{r}') \frac{e^{-ikR}}{R} d\sigma' + \frac{1}{\omega} \int_S (\nabla_s \cdot \mathbf{J}(\mathbf{r}')) \left( \nabla \frac{e^{-ikR}}{R} \right) d\sigma' \right) \times \mathbf{n} \right] = [\mathbf{E}_i \times \mathbf{n}], \quad (1)$$

где  $\mathbf{n}$  – единичная нормаль к поверхности зеркала  $S$ ,  $(\nabla_s, \bullet)$  – оператор поверхностной дивергенции,  $R = |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|$  – расстояние между точкой наблюдения и точкой на поверхности  $S$ ,  $\mathbf{E}_i$  – комплексная амплитуда падающего поля.

Задача дифракции электромагнитной волны, излучаемой электрическим диполем из фокуса коллиматора, была решена с помощью программного комплекса Altair FEKO. Моделирование проводилось для разных частот и поляризаций падающей волны. Исследуемая область в форме прямоугольного параллелепипеда имеет линейный размер, примерно равный максимальному линейному размеру коллиматора. Абсцисса центра параллелепипеда равна удвоенному фокусному расстоянию. Распределения амплитуды и фазы поля волны, отраженной от коллиматора, изображенного на рисунке 1, показаны на рисунке 2 и рисунке 3:

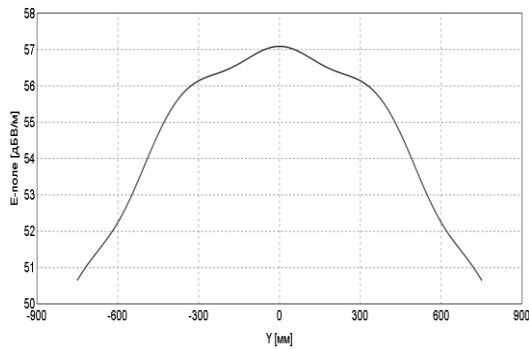


Рисунок 2 – Распределение амплитуды поля в сечении исследуемой области плоскостью  $x = 2F$  на высоте центра зеркала

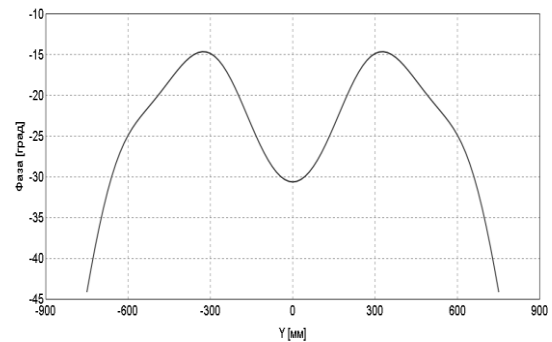


Рисунок 3 – Распределение фазы поля в сечении исследуемой области плоскостью  $x = 2F$  на высоте центра зеркала

Приблизительная ширина рабочей зоны для созданного коллиматора равна 60 см. Внутри рабочей зоны поле оказывается близким к полю плоской волны, отклонения характеристик поля не превышают предельно допустимых значений.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] М.И. Пропой и др. // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. – 2022. – № 6. – С. 26.
- [2] M.I. Propoy et. all // 2023 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW-2023). Book of Conference Papers. – 2023. – P. 38.
- [3] S. Rao, D. Wilton, A. Glisson // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1982. – V. 30. – No. 3. – PP. 409–418.

**ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ БИСТАТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДОБАВОЧНОЙ МИШЕНИ  
Р.В. Гильмутдинов, С.А. Федоров, Н.Л. Меньших  
ИТПЭ РАН**

В последнее время в литературе наметилась четкая тенденция увеличения числа работ, посвященных измерениям бистатических характеристик. Для измерений бистатических характеристик рассеяния создаются новые стенды. Разработана установка [1] для регистрации малого уровня отражения от материала, имеющего низкий модуль коэффициента отражения (МКО) на частотах 360–450 ГГц. В [2], [3] нами разработан метод анализа сигналов при бистатических измерениях, позволяющий существенно уменьшить погрешность измерений. Метод основан на вычитании во временной области фонового сигнала из сигнала исследуемого образца. С помощью данного метода обработаны некоторые экспериментальные результаты МКО для различных образцовых материалов. Использование представленного метода позволило уменьшить максимальную погрешность измерения частотной зависимости коэффициента отражения при бистатических углах более 120 градусов с  $\pm 10$  дБ до  $\pm 1$  дБ.

Для увеличения точности измерения при бистатических углах более 140 градусов, когда сигнал прямого прохождения между антеннами намного больше отраженного сигнала от образца, предлагается использовать дополнительную мишень в целях прецизионного позиционирования антенн. В качестве дополнительной мишени была использована металлическая сфера. Сфера обеспечивает малую временную протяженность сигнала, что связано с небольшой областью отражения.

Метод реализуется следующим образом: во временной области совмещаются и вычитаются сигналы от дополнительной мишени при измерении характеристик образца и при измерении фона. Временной сдвиг для минимума сигнала от мишени не равен сдвигу по времени для минимума сигнала прямого прохождения. Так как время прохождения сигнала между антеннами и сигнала, отраженного от мишени, разное, то с помощью геометрических преобразований можно определить зависимость сдвигов по времени для синтезированного фона.

С помощью данной методики были измерены бистатические характеристики рассеяния от образца материала. На рисунке 1 представлены зависимости МКО от частоты и бистатического угла с использованием синтезированного фона [2] (рисунок 1(а)) и с использованием добавочной мишени (рисунок 1(б)). Искажения на высоких и низких частотах связаны с эффектом Гиббса при применении метода time-domain. Использование



додавочной мишени позволяет расширить угловой диапазон измерений. Поскольку методика обработки сигналов с использованием дополнительной мишени используется при углах больше 120 градусов, то значения МКО на рисунке 1(б) в области от 0 до 120 градусов получены с использованием синтеза фазы.

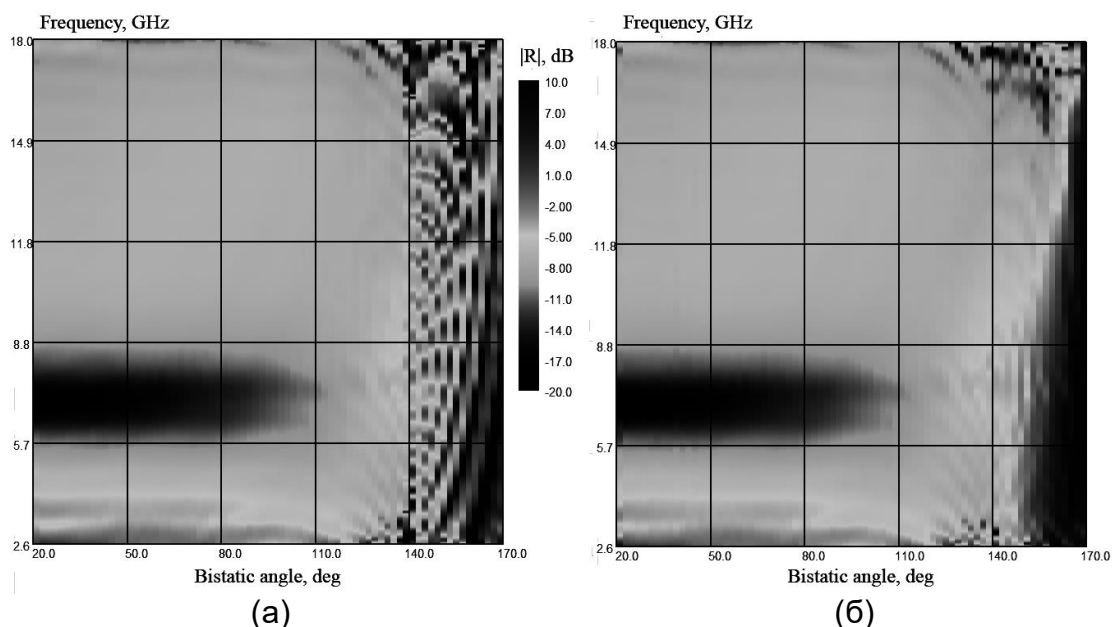


Рисунок 1 – Значения МКО, полученные  
(а) – при «синтезированном фоне»,  
(б) – при использовании добавочной мишени

Разработанная методика использует разделение сигнала во временной области. Совмещение сигналов отражения от добавочной мишени позволяет существенно уменьшить влияние прямого прохождения сигнала между антеннами и получить более точные значения характеристик рассеяния. Это необходимо, например, чтобы уточнить значения угла Брюстера для плоских образцов с материалом.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] M. Jin, B. Li and M. Bai On the Reflectivity Measurements of Microwave Blackbody in Bistatic Near-Field Configuration // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2021. – V. 69. – No. 11. – P. 8027–8032.
- [2] S.A. Fedorov, R.V. Gilmutdinov and N.L. Menshikh Reducing Error of Position When Measuring the Bistatic Reflection Coefficient // 7th All-Russian Microwave Conference (RMC). – 2020. – P. 276–278.
- [3] Н.Л. Меньших, В.С. Солосин, С.А. Федоров Увеличение углового диапазона на стенде для измерения бистатических характеристик рассеяния // Сборник тезисов 22-ой ежегодной научной конференции ИТПЭ РАН. – 2021.

## **ЗАДАЧА СИНТЕЗА ПОГЛОЩАЮЩИХ СКРУГЛЁННЫХ КРАЁВ ДЛЯ ОДНОЗЕРКАЛЬНОГО ПАРАБОЛИЧЕСКОГО КОЛЛИМАТОРА**

**Ф.Б. Хлебников<sup>1</sup>, А.Н.Боголюбов<sup>1</sup>, Н.Е. Шапкина<sup>1,2</sup>, Д.А. Коняев<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет, каф. математики

<sup>2</sup>ИТПЭ РАН

Компактный полигон – это измерительный стенд, решающий важную проблему практической электродинамики: формирование плоской электромагнитной волны в определённой области пространства, называемой рабочей зоной. Важнейшим элементом такого измерительного комплекса является установленный внутри безэховой камеры, покрытой изнутри радиопоглощающим материалом, коллиматор, преобразующий излучение от точечного источника в плоскую волну. Поле зеркального коллиматора подвержено влиянию дифракционных эффектов, которые возникают на кромке зеркала и, искажая поле в рабочей зоне, вносят серьёзную погрешность в измерения на компактном полигоне [1].

Одним из широко распространённых способов борьбы с дифракцией на краях коллиматора является использование отогнутых в зону тени кромок [2]. У такого решения есть свои плюсы и минусы: снижая влияние краевых эффектов, оно одновременно усиливает интенсивность боковых лучей, которые изначально могли быть направлены в направлении от рабочей зоны, но отразились от стенок безэховой камеры. При измерениях такие лучи обычно ведут себя как мнимые источники излучения и могут внести серьёзный вклад в неоднородность поля в рабочей зоне, особенно в том случае, когда зеркало имеет большие размеры, и установить его в отдалении от стенок безэховой камеры не представляется возможным.

С целью улучшения характеристик коллиматоров со скруглёнными краями был разработан вычислительный программный комплекс, предназначенный для решения целого ряда прямых и обратных задач дифракции, связанных с зеркальными коллиматорами с идеально проводящей или импедансной поверхностью [3]. В настоящей работе было показано, что регулировать интенсивность боковых лучей можно при помощи покрытия скруглённых краёв коллиматора материалом, электродинамические свойства которого отличаются от свойств металла, из которого состоит зеркало.

Покрытие краёв зеркала поглощающим материалом может резко снизить интенсивность боковых лучей, но в то же время оно уменьшает и эффективность самих скруглённых кромок, повышая неоднородность поля в рабочей зоне.

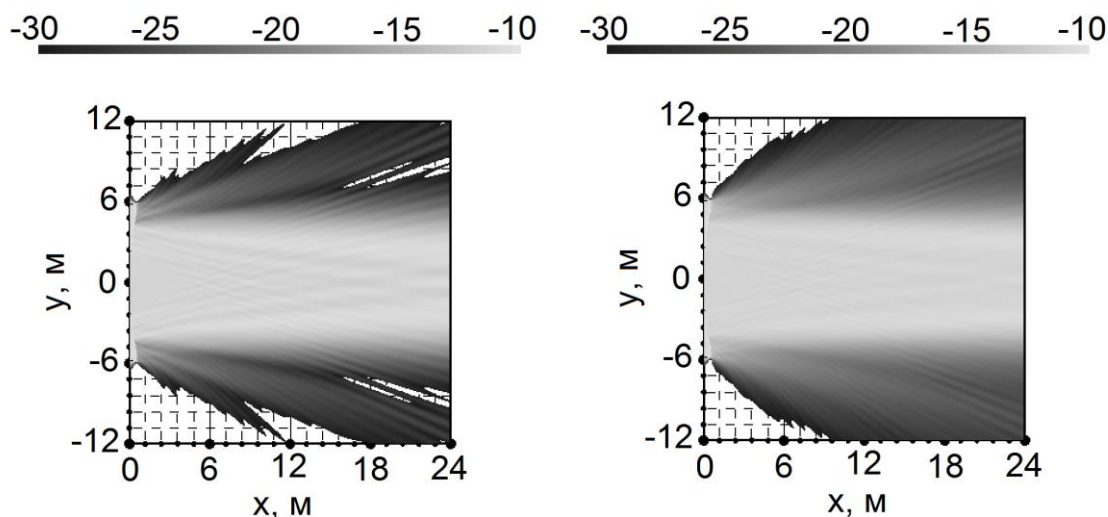


Рисунок 1 – Амплитуда поля, отражённого от коллиматора с краями, покрытыми материалами с различными значениями импеданса

Чтобы найти компромиссное значение импеданса материала, была поставлена соответствующая задача синтеза, которая была успешно решена при помощи метода Нелдера–Мида [4]. Найденное при помощи программного комплекса решение позволяет снизить интенсивность боковых лучей, отражённых от коллиматора, при этом неоднородность отражённого поля в рабочей зоне не превышает 1 дБ.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Н.П. Балабуха, А.С. Зубов, В.С. Солосин Компактные полигоны для измерения характеристик рассеяния объектов. – М.: Наука, 2007.
- [2] I.J. Gupta, K.P. Ericksen, W.D. Burnside A Method to Design Blended Rolled Edges for Compact Range Reflectors // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1990. – V. 38. – No. 6. – С. 853–861.
- [3] А.Н. Боголюбов, Н.А. Боголюбов, Д.А. Коняев и др. Оптимизация формы зеркального коллиматора со скругленными краями // Физические основы приборостроения. – 2019. – Т. 8. – № 3. – С. 19–27.
- [4] J.A. Nelder, R.A Mead Simplex Method for Function Minimization // The Computer Journal. – 1965. – V. 7. – No. 4. – С. 308–313.

## О РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДА МОМЕНТОВ В ЗАДАЧАХ ДИФРАКЦИИ ДЛЯ ИДЕАЛЬНО ПРОВОДЯЩИХ ТЕЛ

А.А. Викуловская<sup>1,2</sup>, Д.А. Коняев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ИТПЭ РАН

<sup>2</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет, каф. математики

Для решения задач радиолокации необходимо изучить рассеяние плоской электромагнитной волны на различных объектах. Для этого на практике часто применяются измерительные комплексы – компактные полигоны [1], а также методы математического моделирования. Эффективным подходом в случае решения задачи дифракции электромагнитной волны на идеально проводящем теле является сведение краевой задачи к интегро-дифференциальному уравнению [2] с последующим использованием метода моментов:

$$\frac{i}{4\pi} \left[ \omega\mu \int_S \mathbf{J}(\mathbf{r}') \frac{e^{-ik|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} d\sigma' + \frac{1}{\omega\varepsilon} \int_S (\nabla'_s \cdot \mathbf{J}(\mathbf{r}')) \frac{e^{-ik|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} \mathbf{n} \right] = [\mathbf{E}^i, \mathbf{n}], \quad (1)$$

где  $\mathbf{J}(\mathbf{r}')$  – плотность тока на поверхности проводника,  $\mathbf{E}^i$  – напряженность падающего поля,  $\mathbf{n}$  – внешняя нормаль к поверхности  $S$  проводника. Например, этот метод используется в универсальном программном комплексе ФЕКО, разработанном для решения задач дифракции на различных объектах [4]. Одной из проблем при использовании этого программного комплекса является то, что алгоритмы расчетов скрыты от пользователя, что ставит ограничения на адаптацию и подстройку программы к конкретной задаче.

В ходе численного решения задачи с помощью метода моментов необходимо аппроксимировать поверхность проводника треугольной сеткой. Затем приближенное решение задачи (1) ищется в виде линейной комбинации базисных функций. В данной работе используются функции RWG [5]. Интегралы по треугольникам сетки, возникающие при численном решении, не вычисляются аналитически. В работе реализовано применение шеститочечных квадратурных формул Гаусса [6] для вычисления данных интегралов с целью повышения точности вычислений. Проведено тестирование программы: сравнение численных результатов с аналитическим решением для задачи дифракции на сфере и численным решением, получаемым предыдущей версией разработанных программ, а также с другим программным комплексом – ФЕКО. Все сравнения показали полное качественное и количественное согласие. Пример сравнения приведен на рисунке 1.

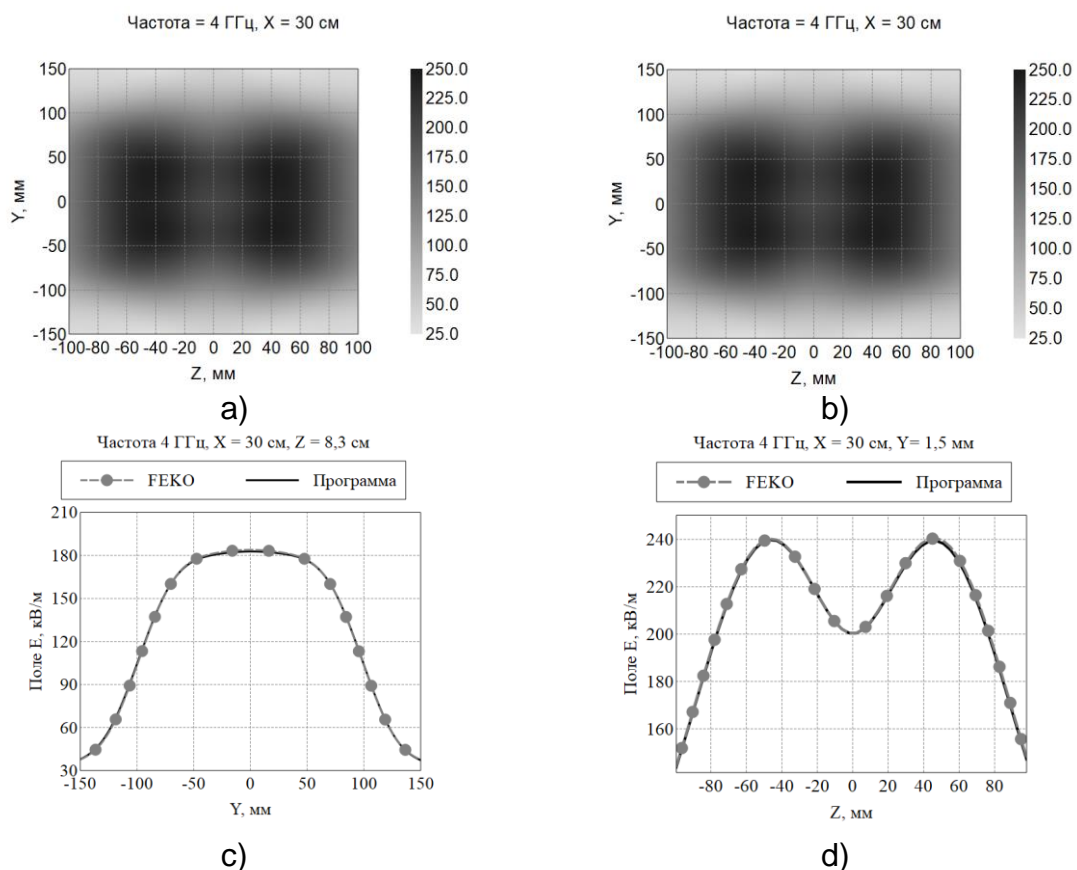


Рисунок 1 – поле  $|E|$  на расстоянии  $X = 30$  см от начала координат:  
 (а) – в плоскости перед антенной (рассчитано в FEKO);  
 (б) – в плоскости перед антенной (рассчитано в программе);  
 (с) – от  $Y$  при  $Z = 83$  мм; (д) – от  $Z$  при  $Y = 1,5$  мм

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Н.П. Балабуха, А.С. Зубов, В.С. Солосин Компактные полигоны для измерения характеристик рассеяния объектов. – М.: Наука, 2007.
- [2] L.N. Medgyesi-Mitschang, C. Eftimiu Scattering from Axisymmetric Obstacles Embedded in Axisymmetric Dielectrics: The Method of Moments Solution // Applied Physics. – 1979. – V. 19. – No. 3. – P. 275–285.
- [3] С.Е. Банков, А.А. Курушин Практикум проектирования СВЧ структур с помощью FEKO. – М.: ЗАО «НПП «РОДНИК», 2009.
- [4] S. Rao, D. Wilton, A. Glisson Electromagnetic Scattering by Surfaces of Arbitrary Shape // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1982. – V. 30. – No. 3. – P. 409–418
- [5] D.A. Dunavant High Degree Efficient Symmetrical Gaussian Quadrature Rules for the Triangle // International Journal for Numerical Methods in Engineering. – 1985. – V. 21. – No. 6. – P. 1129–1148.

# ЭФФЕКТ ОСЛАБЛЕНИЯ ПОЛЯ В УСТРОЙСТВЕ СОЗДАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ПОМЕХИ ДЛЯ АВАРИЙНОГО ПРИЗЕМЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ «ФИЛДМАТИК»

**Л.В. Брук, Н.Л. Меньших**

ИТПЭ РАН

Задача создания электромагнитной помехи для аварийного приземления несанкционированных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) либо принудительного приземления вышедших из-под контроля БПЛА с целью их спасения в настоящее время набирает актуальность в связи с увеличением количества БПЛА, используемых в разных отраслях народного хозяйства.

Известны устройства противодействия беспилотным летательным аппаратам [2], [3] посредством создания электромагнитной (ЭМ) помехи в его радиочастотном оборудовании (рисунок 1). Но такие устройства не позволяют увеличивать мощность ЭМ излучения без причинения вреда здоровью оператора.

Задача исследования заключается в создании такого распределения (конфигурации) ЭМ поля (рисунок 2), при которой интенсивность излучения в зоне нахождения оператора оказывается минимальной, но максимальной в направлении на БПЛА. Такое распределение позволило бы увеличивать мощность направленного на БПЛА ЭМ пучка, уменьшая при этом вредоносное воздействие ЭМ излучения на оператора до предельно допустимых уровней ЭМИ РЧ СанПин 2.1.2.2645-10 (10 мкВт/см.кв).

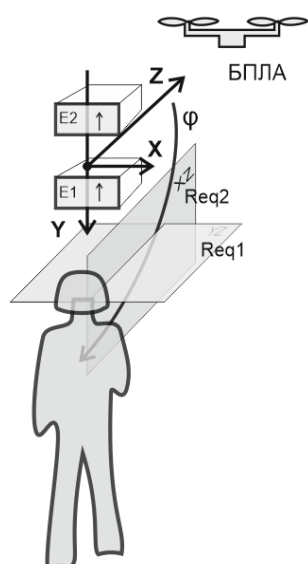


Рисунок 1 – Привязка направлений

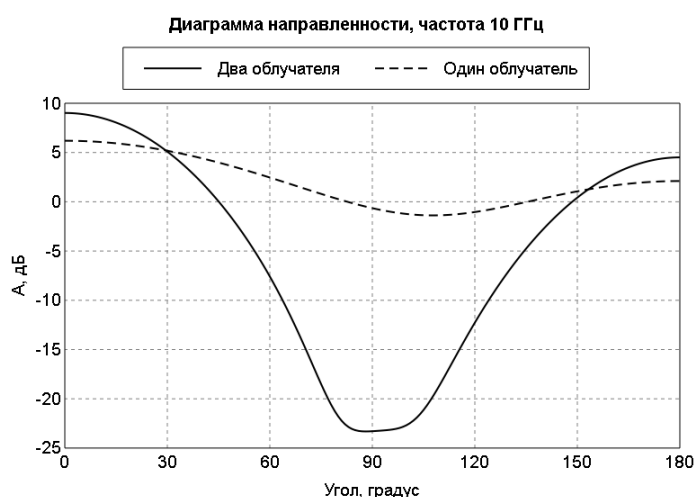


Рисунок 2 – Срез ДН одноствольного и двуствольного облучателя

Решение задачи достигается использованием двуствольного излучателя (рисунки 1, 3), стволы которого разнесены друг от друга на расстоянии полуволны в направлении, перпендикулярном направлению на БПЛА. Расчеты были приведены с применением программы Феко на примере излучателей в виде двух открытых концов волноводов, работающих на частоте 10 ГГц. Вместе с тем следует ожидать, что эффект ослабления может быть достигнут на любой частоте излучения. Проведенные расчеты показали ослабление напряженности ЭМ поля на 22 дВ. При этом мощность излучения в направлении на БПЛА увеличивается на 3 дВ.

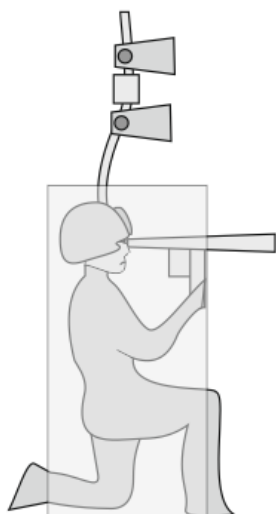


Рисунок 3 – «Туннель безопасности»

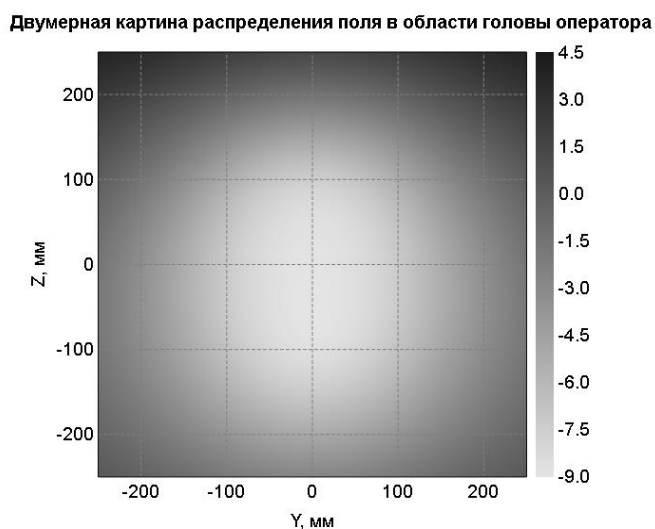


Рисунок 4 – Распределение поля в горизонтальном сечении в области размещения головы оператора

Рисунки 3 и 4 показывают форму «туннеля безопасности» (светлые области на рисунках), создаваемого двуствольным излучателем.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Л.Д. Гольдштейн, Н.В. Зернов Электромагнитные поля и волны. – М.: Советское радио, 1970.
- [2] К.Г. Верхунов Устройство противодействия беспилотным летательным аппаратам. Федеральная служба по интеллектуальной собственности. – ПМ RU.178.484 (U1).
- [3] И.Н. Белоконь, Е.Н. Бойко Способ борьбы с беспилотными летательными аппаратами ближнего и малого радиуса действия с помощью электромагнитного излучения дециметрового диапазона длин волн. – Федеральная служба по интеллектуальной собственности. – RU.2551 (C1).

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МОНОРЕЛЬСА ТАЛИ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Н.П. Балабуха, Е.В. Булычев, Н.Л. Меньших, В.С. Солосин

ИТПЭ РАН

Для установки исследуемых объектов на пилон или антенный позиционер, а также для установки самих позиционеров в штатное положение в автоматизированном измерительном комплексе – компактном полигоне (АИК-КП) используется тельфер. Тельфер перемещается по монорельсу в виде двутавра, расположенному параллельно оптической оси коллиматора измерительного комплекса (рисунок 1). Конструктивно монорельс тельфера проходит непосредственно над рабочей зоной АИК-КП – области пространства, в которой пришедшую от коллиматора волну можно считать квазиплоской [1]. Из-за этой конструктивной особенности в некоторых ситуациях возникают переотражения между объектом измерения, помещенным в рабочую зону, и монорельсом тельфера.

В данной работе представлено исследование влияния переотражений между монорельсом тельфера и исследуемым объектом, а также описана разработанная схема покрытия монорельса для снижения этого влияния.



Рисунок 1 – Геометрия монорельса тельфера с размерами проема под него

Расчет взаимодействия объекта с монорельсом тельфера проводился методом физической оптики (ФО) и методом моментов (ММ). Рассмотрены модельные задачи с простым объектом – круглым проводящим диском.

Диск диаметром 1 м установлен в центре рабочей зоны и наклонен под углом  $45^\circ$  по углу места. При частоте 3,13 ГГц ЭПР диска при нормальном падении составляет 29,3 дБм<sup>2</sup>, ЭПР при наклоне диска на  $45^\circ$  составляет минус 16,7 дБм<sup>2</sup>. Переотраженный монорельсом сигнал



при наклоне диска на  $45^\circ$  составляет  $13,6 \text{ дБм}^2$ . Данный сигнал значительно превышает измеряемый сигнал от диска и требует применения дополнительных средств обработки при измерениях.

Для оценки влияния формы монорельса рассмотрен диск диаметром 4 м, установленный в центре рабочей зоны под углом места  $45^\circ$  и углом крена 16 градусов. При углах крена больше 12 градусов отраженный от диска луч попадает на двугранный угол, образованный верхней полкой и вертикальной стойкой швеллера монорельса. На рисунке 2 представлены распределения полей, рассеянные двугравом монорельса и только его нижней полкой. На монорельс падает плоская волна, отраженная от диска в описанном выше положении. Видно, что наличие двугранного уголка влияет на отраженное от монорельса поле.

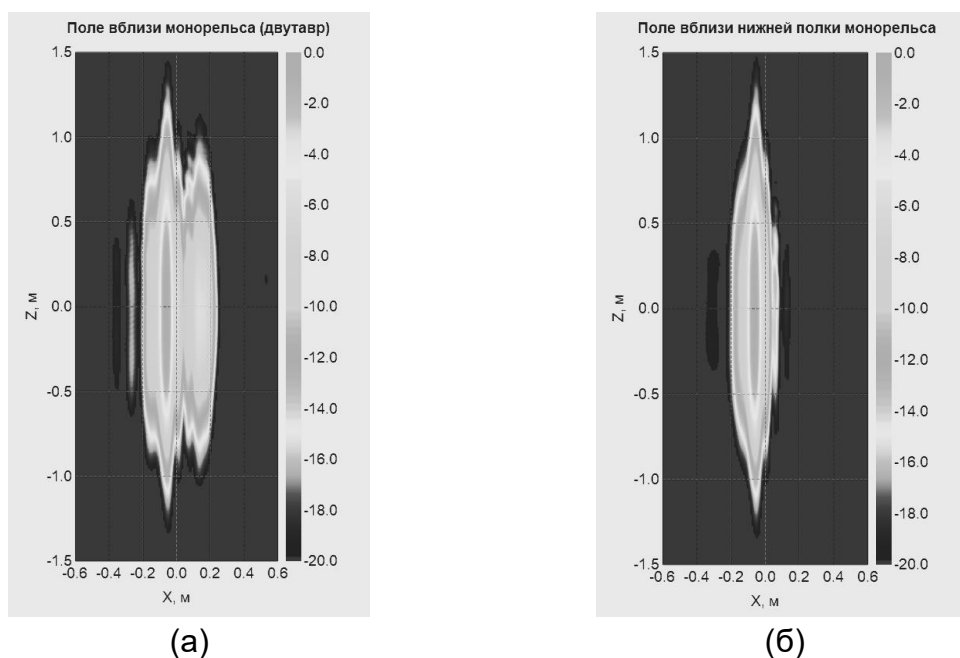


Рисунок 2 – Распределение рассеянного поля вблизи монорельса тельфера (а) – двугавра и (б) – нижней полки монорельса при частоте 10 ГГц, амплитуда нормирована

Для снижения влияния взаимодействия объекта с монорельсом тельфера на нижнюю и обращенную вниз часть верхней полки монорельса установлен широкополосный РПП РАН-57. В результате достигнуто снижение уровня переотражений между тельфером и объектом на 13 дБ в диапазоне частот от 8,2 до 12 ГГц.

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Н.П. Балабуха, А.С. Зубов, В.С. Солосин, Компактные полигоны для измерения характеристик рассеяния. – М.: Наука, 2007. – 266 с.

**ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ КОБАЛЬТА НА ДИНАМИЧЕСКИЕ МАГНИТНЫЕ  
СВОЙСТВА ФЕРРОМАГНИТНЫХ ПОРОШКОВ СИСТЕМЫ  $Fe_{1-x}Co_x$ ,  
ПОЛУЧЕННЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ СПРЕЙ-ПИРОЛИЗОМ  
А.В. Артёмова, С.С. Маклаков, А.В. Осипов, А.О. Ширяев,  
П.А. Зезюлина, Д.А. Петров, К.Н. Розанов, А.Н. Лагарьков  
ИТПЭ РАН**

Разработка новых ферромагнитных порошковых материалов системы  $Fe_{1-x}Co_x$  и установление взаимосвязи между структурой и магнитными свойствами имеют большое значение для развития современных технологий. Метод ультразвукового спрей-пиролиза позволяет получать ферромагнитные нано- и микропорошки широкой номенклатуры составов [1,2]. Порошки находят применение в катализе, литий-ионных батареях, концентраторах и поглотителях СВЧ поля.

Впервые получены порошки  $Fe_{1-x}Co_x$  методом распылительного пиролиза смеси  $Fe(NO_3)_3$  и  $Co(NO_3)_2$  в объемном соотношении 50:50, 70:30, 80:20 с последующим отжигом в водороде при  $400^\circ C$ . Оценка соотношения элементов Fe и Co проведена с помощью локального рентгеноспектрального анализа. На СЭМ-микрофотографиях частицы имеют гладкую поверхность и характерную для метода распылительного пиролиза полую структуру. Толщина стенки изменяется от 100 до 600 нм. Максимум распределения частиц по размерам составляет 0,6 мкм, максимальный размер – 3 мкм и не зависит от содержания Co.

Полученные частицы порошков  $Fe_{1-x}Co_x$  находится в состоянии твердого раствора, что подтверждено результатами Мессбауэровской спектроскопии и рентгенофазового анализа. Анализ распределения статистики состояний железа в окружении кобальта показывает, что однородность твердых растворов Co в Fe высокая и не зависит от состава. С увеличением содержания кобальта наблюдается увеличение сверхтонкого поля на ядрах железа, что характерно для данной системы. Экспериментально зафиксировано высокое значение сверхтонкого поля на ядрах железа, превышающее типичные значения, встречающиеся в литературе. Параметр решетки для чистого Fe равен 2,886 Å; при увеличении содержания кобальта в порошках параметр уменьшается с 2,875 до 2,851 Å, что соответствует табличным данным. При этом размер кристаллитов, рассчитанный по уширению рентгеновских линий, составляет 20–30 нм.

С помощью прибора синхронного термического анализа исследованы процессы окисления полученных порошков  $Fe_{1-x}Co_x$  в диапазоне температур от 30 до  $900^\circ C$  на воздухе. Известно, что при сгорании в кислороде железо и кобальт окисляются до высших оксидов ( $Fe_3O_4$ ,  $Co_3O_4$ ) или феррита

со структурой шпинели. Набор массы, количественная гранулометрическая характеристика, уменьшается при увеличении содержания Co. Также наблюдается увеличение температурной стойкости со 140°C до 160°C. Процесс характеризуется экзотермической реакцией, при этом количество выделенной энергии увеличивается с 4,2 до 4,9 кДж/г.

Fe<sub>70</sub>Co<sub>30</sub> обладает наибольшей намагниченностью насыщения среди известных металлов и сплавов. Магнитные свойства зависят от кристаллической структуры и изменяются в зависимости от химического соотношения. Для полученных Fe<sub>80</sub>Co<sub>20</sub>, Fe<sub>70</sub>Co<sub>30</sub>, Fe<sub>50</sub>Co<sub>50</sub> и чистого железа намагниченность насыщения  $M_s$  равна 210, 220, 180 и 195 Гс·см<sup>3</sup>/г соответственно. Большое значение коэрцитивной силы  $H_c$ , 370 Э для образца Fe<sub>50</sub>Co<sub>50</sub>, может быть связано с присутствием оксида Fe<sup>3+</sup>. Для остальных образцов  $H_c$  составляет 250 Э.

Из петель гистерезиса рассчитаны частоты ферромагнитного резонанса, согласующиеся с результатами СВЧ измерений композитов на основе парафиновой матрицы. Добавление кобальта существенно изменяет магнитные спектры: повышается частота естественного ферромагнитного резонанса с 2 до 16 ГГц, уменьшается полуширина максимума магнитных потерь  $\mu''$  при смещении в область высоких частот. Для порошков Fe<sub>70</sub>Co<sub>30</sub> достигается наибольшая величина статической магнитной проницаемости  $\mu_{st}$ , равная 2,5. Амплитуда максимума магнитных потерь соответствует ферромагнитному резонансу и составляет 0,9 для всех образцов.

Дополнительно исследовано влияние температуры восстановления при 300–500°C на магнитный спектр Fe<sub>50</sub>Co<sub>50</sub>. Образец, восстановленный при 400°C, имеет наибольшее значение магнитных потерь на 16 ГГц. При других температурах восстановления магнитные свойства порошков уменьшаются, образец становится радионепрозрачным – быстро растёт  $\epsilon''$  и падает  $\mu_{st}$ . Для порошкового железа, полученного аналогичным методом, при 400°C достигаются оптимальные характеристики магнитного спектра, химической чистоты и гладкости поверхности [3].

Показано, что при помощи ультразвукового спрей-пиролиза можно получать сплавы, обладающие перспективными динамическими магнитными характеристиками.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] A. Kosevich et al. // Coatings. – 2020. – V. 10. – No. 10. – P. 995.
- [2] A.V. Artemova et al. // Sensors. – 2022. – V. 22. – No. 8. – P. 3086.
- [3] A.V. Artemova et al. // Magnetism. – 2023. – V. 3. – No. 2. – P. 90–101.

**ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ ОДНОСЛОЙНЫХ ПЛЕНОК Fe<sub>70</sub>Co<sub>30</sub>  
НА ИХ ДИНАМИЧЕСКИЕ МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА**  
**И.В. Комаров, С.С. Маклаков, С.А. Маклаков, А.О. Ширяев,**  
**А.В. Осипов, А.Н. Лагарьков, К.Н. Розанов**  
ИТПЭ РАН

Тонкие магнитные пленки являются перспективными материалами для создания покрытий и экранов для поглощения электромагнитных волн. Исследование механизмов формирования частотной дисперсии магнитной проницаемости является актуальной задачей. Известно, что с увеличением толщины ферромагнитных плёнок происходит ухудшение высокочастотных свойств, что ограничивает их применение. Этот эффект известен для широкого круга ферромагнетиков [1], но не исследовался ранее для твёрдых растворов бинарной системы Fe-Co.

В работе исследованы зависимости влияния толщины пленок FeCo на динамические магнитные параметры в СВЧ диапазоне. Тонкие ферромагнитные плёнки были получены при помощи магнетронного распыления с осаждением на гибкую полимерную подложку из полиэтилентерефталата толщиной 12 мкм. Толщина пленок варьировалась от 100 нм до 1100 нм.

Измерения СВЧ магнитной проницаемости проводились в коаксиальной измерительной линии. Для этого из каждой пленки были изготовлены четыре образца. Пленку разрезали на полоски, ориентированные в двух взаимно перпендикулярных направлениях (направления «v» и «h»), из которых скручивали образец тороидальной формы (металлом внутрь скрутки «i» и наружу «o»).

Исследованные плёнки демонстрируют СВЧ магнитный спектр с двумя полосами поглощения в диапазоне 1,0–20 ГГц. Высокочастотный максимум поглощения соответствует естественному ферромагнитному резонансу. Низкочастотный максимум поглощения предположительно связан с движением доменных границ. Для проведения анализа магнитных характеристик полученные частотные зависимости магнитной проницаемости аппроксимировались суперпозицией зависимостей Лоренца. Уточнение механизма взаимодействия полученных образцов с электромагнитным излучением в диапазоне частот 1–3 ГГц требует дополнительных экспериментальных исследований.

Обнаружено, что увеличение толщины плёнок FeCo приводит к снижению амплитуды максимума магнитных потерь. В исследованных образцах снижение магнитной проницаемости с ростом толщины сопровождается снижением добротности резонансной линии при 7 ГГц, а также уменьшением параметра Аше [2] с 1 до 0,5.

С увеличением толщины плёнок FeCo высокочастотный резонанс сохраняется в СВЧ спектре магнитной проницаемости образцов. Минимальное значение константы Аше для конфигурации «vi» составляет 0,5. В совокупности два данных наблюдения указывают на то, что исследованные плёнки FeCo толщиной до 1100 нм включительно находятся в «докритическом» состоянии [3], т.е. вектор намагниченности ориентирован в плоскости пленки.

Исследованные плёнки обладают ярко выраженной анизотропией магнитных свойств в плоскости плёнки. Увеличение толщины приводит к изменению ориентации магнитной анизотропии: ось легкого намагничивания изменяет ориентацию из направления «v» в направление «h», переход происходит при толщине плёнки 500 нм.

Вследствие асимметрии поперечной структуры образца (металлическая плёнка толщиной 100–1000 нм на полимерной подложке толщиной 12 мкм) металлический слой в образцах, скрученных металлом наружу, испытывает растяжения, а слой металла в образцах, скрученных металлом внутрь, испытывает сжатие. Показано, что значение константы Аше для образцов, скрученных металлом наружу, близко к единице. Это указывает на то, что величина поля магнитострикции близка к величине поля магнитной анизотропии в исследованных образцах.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] А.В. Осипов и др. Ламинированные наноматериалы для СВЧ: возможности и ограничения // Современная электродинамика. – 2023. – №. 5(7). – С. 39–57.
- [2] O. Acher, S. Dubourg Generalization of Snoek's Law to Ferromagnetic Films and Composites // Phys.Rev. B. – 2008. – V. 77. – P. 104440.
- [3] N.A. Buznikov, K.N. Rozanov The Effect of Stripe Domain Structure on Dynamic Permeability of Thin Ferromagnetic Films with Out-of-plane Uniaxial Anisotropy // J. Magn. Magn Mater. – 2005. – V. 285. – No. 3. – P. 314–326.

# ВОССТАНОВЛЕНИЕ СОБСТВЕННОЙ СВЧ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ФЕРРИТОВ ИЗ ИЗМЕРЕННЫХ МАТЕРИАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.О. Ширяев<sup>1</sup>, К.Н. Розанов<sup>1</sup>, С.Н. Старостенко<sup>1</sup>, В.Г. Костишин<sup>2</sup>,  
Д.А. Петров<sup>1</sup>, А.В. Долматов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИТПЭ РАН

<sup>2</sup>НИТУ МИСИС

Объёмные ферриты и композитные материалы, наполненные порошками ферритов, часто используются для разработки новых материалов для СВЧ применений. Одной из важнейших проблем является описание эффективных свойств композита в зависимости от свойств включений и матрицы. Для решения этой проблемы часто используют формулы смешения. СВЧ свойства объёмных ферритов, в отличие от объёмных ферромагнетиков, могут быть измерены стандартными методами благодаря низкой диэлектрической проницаемости и малому влиянию скин-эффекта. Это дает возможность сравнить измеренную магнитную проницаемость с найденной с помощью формул смешения.

Работа посвящена исследованию СВЧ магнитных и диэлектрических свойств промышленных ферритов марок 30ВН, 50ВН, 600НН, 1000НМ, 2000НМ и 6000НМ и анализу возможности восстановления собственной магнитной проницаемости включений. С помощью векторного анализатора цепей и широкополосного анализатора иммитанса измерены частотные зависимости диэлектрической  $\varepsilon(f)$  и магнитной  $\mu(f)$  проницаемостей как объёмных ферритов, так и композитных материалов, наполненных ферритовым порошком.

Для оценки применимости различных формул смешения был использован метод, предложенный в [1]. Метод основан на анализе нормированной обратной восприимчивости  $\eta$  композитного материала

$$\eta = \frac{p}{\varepsilon_{эфф} / \varepsilon_m - 1} \quad \text{и} \quad \eta = \frac{p}{\mu_{эфф} - 1},$$

где  $p$  – объёмная концентрация включений,  $\mu_{эфф}$  и  $\varepsilon_{эфф}$  – эффективные магнитная и диэлектрическая проницаемости композитного материала,  $\varepsilon_m$  – диэлектрическая проницаемость матрицы. Анализ СВЧ свойств композитов в виде нормированной обратной восприимчивости является полезным инструментом для изучения эффектов, определяющих магнитную проницаемость композитов, таких как магнитное взаимодействие между включениями и распределение частиц по форме.

В работе исследована применимость формул смешения для одновременного описания диэлектрической и магнитной проницаемостей композитов в СВЧ диапазоне частот. Исследованы СВЧ свойства композитных материалов, наполненных включениями ферритов одинаковой формы, но разных размеров. С помощью метода нормированной обратной восприимчивости  $\eta$  показано, что магнитная проницаемость композиционных материалов с высокой точностью описывается формулой смешения Максвелла Гарнетта [1] вплоть до концентраций 60 об.%. На рисунке 1 представлена частотная зависимость восстановленной магнитной проницаемости феррита марки 2000НМ при различной концентрации включений в композитном материале.

Однако восстановленная с помощью формул смешения магнитная проницаемость феррита существенно отличается от измеренной (рисунок 2). Проведён анализ возможных причин несоответствия: высокая погрешность восстановления, ошибки в определении концентрации включений и отличие материалов объёмного и порошкового ферритов. Наиболее вероятной причиной расхождения является различие доменных структур и размагничивающих полей частиц и объёмного феррита.

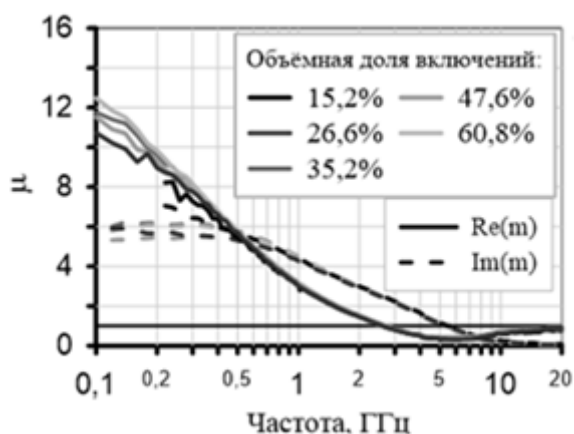


Рисунок 1 – Частотная зависимость собственной магнитной проницаемости феррита, восстановленная с помощью формулы смешения Максвелла Гарнетта из измеренных зависимостей магнитной проницаемости композитов

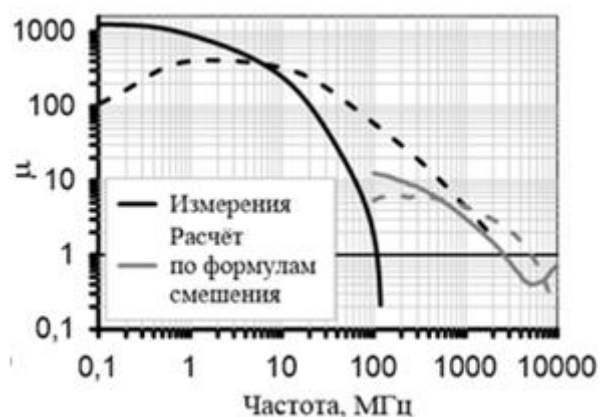


Рисунок 2 – Сравнение измеренной магнитной проницаемости объёмного феррита и магнитной проницаемости, восстановленной из материальных параметров композитов

## ЛИТЕРАТУРА

[1] K.N. Rozanov et.al. // Proc. Eng. – 2017. – V. 216. – P. 85–92.

# ИССЛЕДОВАНИЕ СВЧ И МАГНИТОСТАТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ NI-ZN-CO ШПИНЕЛЬНЫХ ФЕРРИТОВ

П.А. Зезюлина<sup>1</sup>, Д.А. Петров<sup>1</sup>, А.О. Ширяев<sup>1</sup>,  
Д.А. Винник<sup>2</sup>, В.Е. Живулин<sup>2</sup>, Д.П. Шерстюк<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ИТПЭ РАН

<sup>2</sup>ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»

Никель-цинковые ферриты со структурой шпинели обладают большим потенциалом и широким спектром применения в СВЧ диапазоне благодаря уникальному сочетанию таких свойств, как высокая намагниченность насыщения, низкая коэрцитивная сила, низкие потери на вихревые токи, высокая механическая прочность, высокая температура Кюри [1]. Известно, что замещение ионов никеля ионами кобальта приводит к модификации магнитокристаллической анизотропии (МКА) феррита и смещению его рабочего диапазона в более высокочастотную область [2].

В работе изучены СВЧ и магнитостатические свойства серии спеченных шпинельных ферритов с составом  $Zn_{0.3}Ni_{0.7-x}Co_xFe_2O_4$  ( $x$  от 0 до 0,7). Частотные зависимости магнитной проницаемости измерены методом Николсона–Росса–Уира в коаксиальной линии 7/3 в интервале частот от 0,1 до 20 ГГц. Петли магнитного гистерезиса получены с помощью вибрационного магнитометра в интервале полей  $\pm 30$  кЭ.

Измеренные частотные зависимости магнитной проницаемости характеризуются двумя пиками поглощения и с хорошей точностью аппроксимируются суммой двух резонансов Лоренца (рисунок 1).

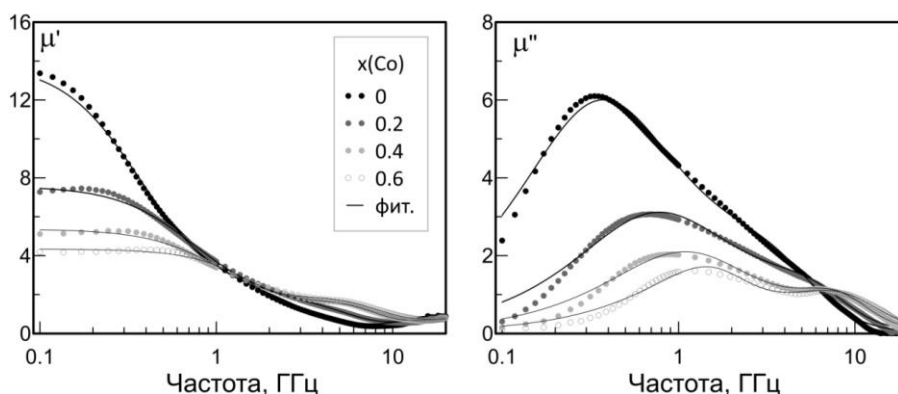


Рисунок 1 – Измеренные частотные зависимости магнитной проницаемости образцов состава  $Zn_{0.3}Ni_{0.7-x}Co_xFe_2O_4$  и их аппроксимация суммой резонансов Лоренца

Увеличение количества кобальта слабо влияет на положение низкочастотного резонанса, при этом высокочастотный резонанс смещается с 4,8 до 12 ГГц (рисунок 2). Обычно низкочастотные потери в ферритах



связывают с резонансом доменных границ (ДГ), высокочастотные – с естественным ферромагнитным резонансом (ЕФМР) [3].

Частота ЕФМР связана с полем МКА  $H_a$  уравнением Киттеля

$$f_{рез} = \gamma H_a, \quad (1)$$

где  $\gamma = 2,8$  ГГц/кЭ.

Значения полей МКА могут быть получены из петель гистерезиса с помощью закона асимптотического насыщения (ЗАН)

$$M = M_s(1 - a/H - b/H^2) + kH, \quad (2)$$

где  $M_s$  – намагниченность насыщения,  $H$  – внешнее магнитное поле. Слагаемое  $a/H$  связано с вкладом локальных неоднородностей, слагаемое  $b/H^2$  – с МКА. Слагаемое  $kH$  описывает парапроцесс в магнетике. Для поликристаллических образцов со случайно ориентированными кристаллитами кубической сингонии имеем [4]:

$$b = 8K_1^2 / 105M_s^2, \quad (3)$$

где  $K_1$  – первая константа анизотропии.

Сравнение резонансных частот, рассчитанных из магнитостатических данных с помощью ЗАН, с результатами СВЧ измерений показывает, что высокочастотный пик магнитной проницаемости исследуемых ферритов соответствует ЕФМР (см. рисунок 2).

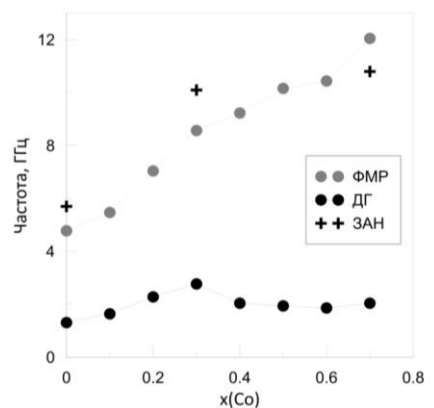


Рисунок 2 – Зависимости частоты резонанса ДГ и ЕФМР от степени замещения  $x(\text{Co})$ . Точки – СВЧ данные, крестики – данные, полученные с помощью ЗАН

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] С.М. Rost et. al. // Nat. Commun. – 2015. – V. 6. – P. 8485.
- [2] H.S. Guo et. al. // Ceram. Int. – 2022. – V. 48. – P. 22516–22522.
- [3] Jian Liang Xiea et. al. // J. Magn. Magn. Mater. – 2007 – V. 314. – P. 37–42.
- [4] С. Тикадзуми Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и практические применения. – Москва: Мир, 1987. – 419 с.

## **ВЛИЯНИЕ УПОРЯДОЧЕННОСТИ МАГНИТНЫХ ПЛАСТИНЧАТЫХ ЧАСТИЦ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПРОНИЦАЕМОСТЬ КОМПОЗИТОВ С ПОЛИМЕРНОЙ МАТРИЦЕЙ**

**В.И. Дели<sup>1,2</sup>, А.В. Артёмова<sup>1</sup>, С.С. Маклаков<sup>1</sup>, А.В. Долматов<sup>1</sup>,  
С.А. Маклаков<sup>1</sup>, А.О. Ширяев<sup>1</sup>, А.Н. Лагарьков<sup>1</sup>, К.Н. Розанов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>ИТПЭ РАН

<sup>2</sup>РТУ МИРЭА

Композитные материалы с ферромагнитными включениями применяют в задачах прикладной электродинамики [1]. Динамические магнитные свойства таких композитов зависят не только от состава и формы частиц включений, но и от распределения частиц в объёме матрицы. В зависимости от формы частиц включений возможно возникновение упорядоченности в объёме композита. Для металлических частиц пластинчатой формы упорядоченное слоистое взаимное расположение частиц приводит к высокой диэлектрической проницаемости композита, что ограничивает его электродинамическую эффективность. Нарушение упорядоченного слоистого расположения пластинчатых частиц в объёме композита является нетривиальной физико-химической задачей.

Предложен модельный эксперимент, демонстрирующий возможность нарушения упорядоченности пластинчатых частиц на масштабе долей миллиметра. Идея заключается в том, что композит с упорядоченным расположением частиц измельчается на «механические домены» и заново формируется. Для реализации использован термоформирующийся полимер, сополимер тетрафторэтилена с винилиден фторидом (фторопласт-42, конкретно, Ф-42В).

Для получения композитного материала навеску порошка Ф-42В растворяли в ацетоне при температуре 40°C для получения 10 масс.% раствора. При непрерывном перемешивании добавляли навеску порошка наполнителя. Массовое содержание наполнителя в композите рассчитывали по массе сухих компонент. Изготавливали композиты с содержанием магнитных компонентов от 5 до 30 масс.%. В качестве наполнителя использовали пластинчатые частицы со слоистой структурой, полученные по планарной технологии, включающей стадию магнетронного распыления. Полученную смесь сушили на воздухе при 60°C. В результате получали плёнку композиционного материала, которую далее механически измельчали на элементы с латеральным поперечным размером ~0,5 мм.

Полученные частицы композита формовали при температуре 150°C в пресс-форме, соответствующей сечению коаксиального волновода 7/3. Частотные дисперсии диэлектрической и магнитной проницаемостей измеряли по методу Николсона–Росса–Уира в диапазоне частот 0,1–20 ГГц.

Форма кривых частотной зависимости комплексной магнитной проницаемости идентична кривым, измеренным для композитов с тем же магнитным наполнителем, но другими матрицами, парафином и силоксановым каучуком. При этом отношение квазистатических значений действительных диэлектрической и магнитной проницаемостей составляет 7,5. При использовании в качестве матрицы силоксанового каучука данная величина составляет 11.

Полученный результат демонстрирует возможность нарушения упорядоченного слоистого расположения частиц в объёме композитного материала. В проведённом эксперименте слоистое расположение частиц сохраняется в объёме «механического домена» размером до 0,5 мм, но в объёме композита в целом распределение частиц становится изотропным. Данная гипотеза подтверждается изображениями электронной микроскопии.

Дальнейшее исследование магнитных свойств композитов с матрицей Ф-42В представляет фундаментальный интерес с точки зрения проверки применимости электродинамических формул смешения. Физико-механические свойства полимера Ф-42В, а также его химическая стойкость позволяют говорить о возможности использования разработанных материалов для прикладных задач.

## **ЛИТЕРАТУРА**

[1] Розанов, К.Н. Частотно-зависимые магнитные и диэлектрические свойства композитных материалов для широкополосных СВЧ применений. [Текст]: дисс. д.ф.-м.н.: 01.04.11.

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАЗЦОВ С ОТРЕЗКАМИ МИКРОПРОВОДОВ ПРИ ПОВЫШЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

**А.А. Новиков, Н.А. Бузников, Р.А. Князьков, С.С. Маклаков,  
Д.А. Петров, К.Н. Розанов**  
ИТПЭ РАН

Для решения задач электромагнитной совместимости узлов, работающих при повышенных температурах, необходимо создание пластичных материалов, способных сохранять свою структуру под воздействием высокой температуры.

Разработана технология изготовления листовых образцов, состоящих из радиопрозрачной подложки и тонкого слоя в виде отрезков микропроводов. В качестве радиопрозрачной подложки использовалась ткань на основе оксида кремния, характеризующаяся высокой термостойкостью и пластичностью. Отрезки микропроводов содержат в своей структуре жилу из аморфного сплава на основе кобальта диаметром 2 мкм в оболочке из боросиликатного стекла толщиной 7 мкм. Проведено экспериментальное исследование электрофизических характеристик концентрационной серии образцов с микропроводами с циклической программой нагрева до 300, 600, 700 и 800 °С и выдержкой 20 минут.

Измерения частотной зависимости коэффициента прохождения (КП) через образцы в диапазоне частот от 2 до 40 ГГц (рисунок 1) при различных температурах нагрева были выполнены с использованием квазиоптического измерительного стенда. После охлаждения образцов до комнатной температуры было проведено сравнение КП до и после отжига. Обнаружено, что частотная зависимость КП после отжига незначительно изменилась, что говорит об обратимости СВЧ свойств образцов после их охлаждения (рисунок 2). Для оценки состояния микропроводов после отжига проведена сканирующая электронная микроскопия отрезков микропроводов до и после отжига. Установлено, что у части микропроводов в результате отжига при температуре 800 °С имеются незначительные деформации, но практически микропровода остались без изменений (рисунок 3). Следовательно, изменение частотной зависимости коэффициента прохождения через образцы может быть вызвано дефектами части микропроводов после отжига. Проведен анализ частотной зависимости диэлектрической проницаемости слоя микропроводов по релаксационной формуле Дебая [1].

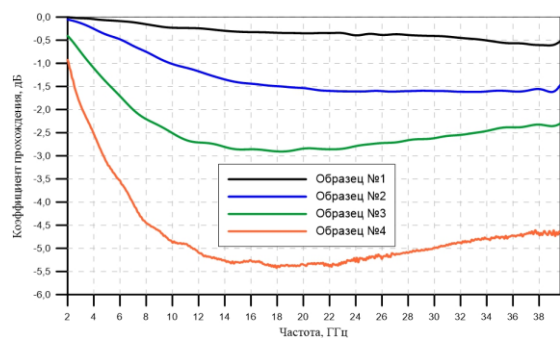


Рисунок 1 – Коэффициент прохождения образцов при комнатной температуре с различной концентрацией отрезков микропроводов, мг/дм<sup>2</sup>:  
 №1 – 17,2; №2 – 34,8;  
 №3 – 68,8; №4 – 137,6

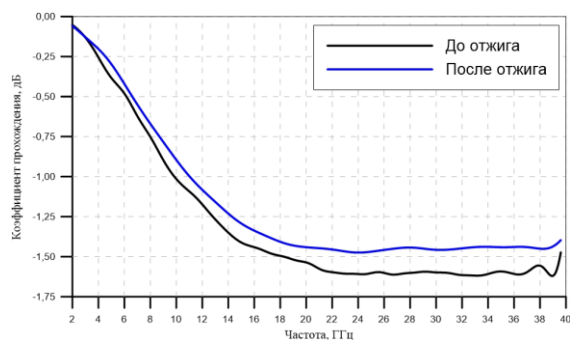
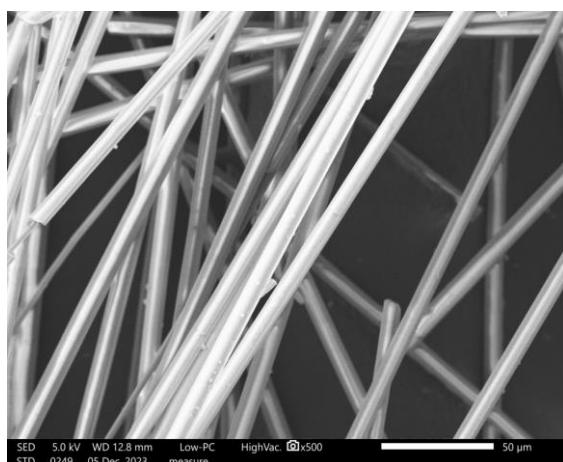
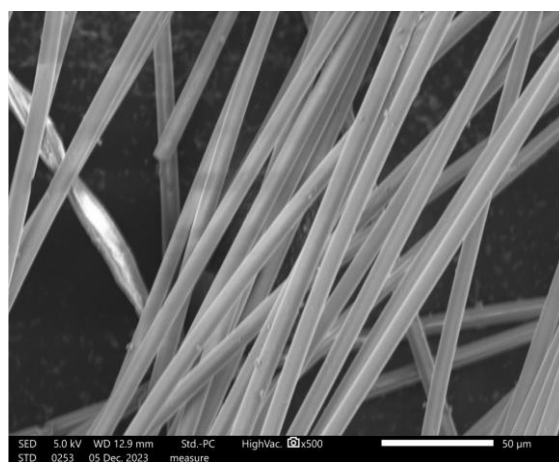


Рисунок 2 – Сравнение частотной зависимости коэффициента прохождения образца при комнатной температуре до и после отжига



а)



б)

Рисунок 3 – Сканирующая электронная микроскопия микропроводов: (а) – до отжига, (б) – после отжига

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Matitsine, S. M. et al. // J. Appl. Phys. – 2003. – V. 94. – P. 1146.

# ПОЛУЧЕНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ЛЕГКИХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ С ЗАДАННОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТЬЮ НА ОСНОВЕ ПЕНОПЛАСТОВ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ

А.В. Долматов, С.Н. Старостенко, Д.А. Петров,

Р.А. Князьков, С.С. Маклаков

ИТПЭ РАН

Представляет интерес разработка методов создания линзовых элементов СВЧ квазиоптики. Для этого требуется разработка легких диэлектриков с заданными свойствами, а также технология придания им необходимой формы.

В работе исследованы свойства композитных материалов с диэлектрической матрицей и металлическими включениями. В качестве матрицы были использованы два вида пенопластов – гранулированный полистирол (ПСВ-С Марка 2) и порошковый терморезактивный пенопласт ПЭН-И-100. В качестве металлических включений – алюминиевая пудра ПАП-2, состоящая из инкапсулированных тонким слоем парафина частиц алюминия пластинчатой формы со средним размером  $20\pm 10$  мкм. Цель работы состояла в получении композитов с заданным значением диэлектрической проницаемости в диапазоне от 1,2 до 6 с низким тангенсом угла диэлектрических потерь и исследовании возможности применения разработанных материалов для изготовления сферической линзы для СВЧ диапазона.

Для оценки параметров модели смешения – критической концентрации и эффективной формы частиц алюминиевой пудры – проведена серия экспериментов с композитами в парафиновой матрице. Оценены значения действительной ( $\epsilon'$ ) и мнимой ( $\epsilon''$ ) частей диэлектрической проницаемости композитов в СВЧ диапазоне частот при концентрациях включений от 5 до 40 %об. Далее значения  $\epsilon'$  аппроксимированы по формуле смешения Оделевского [1]. Полученные значения эффективного форм-фактора включений и критической концентрации использованы для прогнозирования значения  $\epsilon'$  композитов на основе пенопласта. Из численных расчётов следует, что при массовой доле алюминиевой пудры 20% возможно получение композитов со значением  $\epsilon'$  до 15 при минимизации воздушных включений (увеличении плотности композитов).

Изготовление композитов на основе пенопластов и включений из пудры ПАП-2 проходило в несколько этапов. Предварительно удаляли парафиновую оболочку с алюминиевой пудры при помощи растворителя, после этого смешивали порошок терморезактивного пенопласта с алюминиевой пудрой при различных концентрациях (от 2 до 20% массовых). Перемешанную массу

загружали в цилиндрическую прессформу до заданного уровня, которым определялась плотность получаемых композитов. Для вспенивания прессформу выдерживали при температуре 110 °С. Длительность вспенивания композитов на основе полистирола составляла 1 час, на основе ПЭН-И-100 – 6 часов. Вспененные композиты извлекали из пресс формы и измеряли СВЧ частотные дисперсии комплексной диэлектрической проницаемости на стенде для измерений в свободном пространстве с использованием данных лишь о коэффициенте прохождения, поскольку материал не магнитный.

При использовании гранулированного полистирола в качестве матрицы получено значение  $\epsilon'$  композитов от 1,1 до 2,0 в СВЧ диапазоне в зависимости от концентрации включений и конечной плотности. Максимальная концентрация пудры ПАП-2 в данном случае составляла 3 масс.%, увеличение концентрации приводило к неоднородности распределения частиц включений и снижало воспроизводимость результатов. При использовании порошкового пенопласта ПЭН-И-100 синтезированы композиты со значением  $\epsilon'$  от 1,1 до 6,5 и  $\epsilon''$  от 0,005 до 0,65. При концентрации пудры 10 масс.% достигается значение  $\epsilon' = 1,9$ . При концентрации пудры 20% получены композиты с контролируемым значением  $\epsilon'$  от 3 до 6,5 при плотности композитов от 0,2 до 0,45 г/см<sup>3</sup>. Для создания сферической линзы использован композит со значением  $\epsilon' = 3,5$ , выбранным на основании рекомендаций из литературы [2].

Проведен численный расчёт эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) однородной сферы диаметром 80 мм из полученного материала в СВЧ диапазоне частот. С учётом результатов расчёта показано, что ЭПР радиопоглощающего отражателя на основе однородной линзы составляет от 0,001 до 0,09 м<sup>2</sup> диапазоне частот от 1 до 10 ГГц. При том же размере это в среднем меньше на 3–5 дБ в сравнении с ЭПР образцов отражателей с линзой Люнеберга, изготовленных с использованием аддитивных технологий. При этом достоинствами разработанного материала и технологии являются низкая плотность, простота масштабирования процесса производства, возможность технологической обработки для придания необходимой формы.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] S.N. Starostenko; K.N.Rozanov; A.N. Lagar'kov Electrical and Magnetic Properties of the Binary Heterogeneous Mixture Model // Physics of Metals and Metallography – 2021. – V. 82. – P. 323–344.
- [2] В.О. Кобак Радиолокационные отражатели. – Москва: Советское радио, 1975. – 348 с.

## **РАЗРАБОТКА НЕФОСТЕРОВСКОЙ ЦЕПИ С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ИНДУКТИВНОСТЬЮ**

**П.А. Иванов, И.В. Стенищев, Д.А. Петров,**

**В.И. Полозов, К.Н. Розанов**

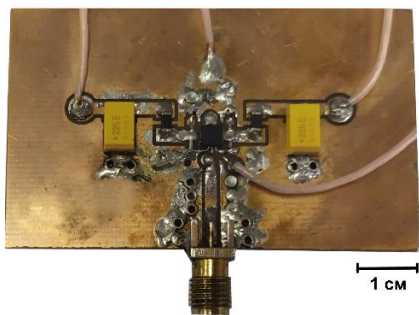
**ИТПЭ РАН**

Разработка широкополосной электрически малой антенны является актуальной задачей в настоящее время. Сложность этой задачи связана с существованием фундаментального ограничения для рабочей полосы частот антенны – предела Чу–Харрингтона [1–2]. Это ограничение справедливо для пассивных материалов, которые подчиняются теореме Фостера [4], утверждающей, что реактивное сопротивление и проводимость пассивного двухполюсника без потерь всегда строго монотонно возрастает с частотой. Преодоление этого ограничения стало возможно с использованием нефостеровских цепей, работа которых описывается отрицательными значениями сопротивления, емкости и индуктивности, и характеристики которых имеют отрицательный наклон реактивного сопротивления и проводимости от частоты.

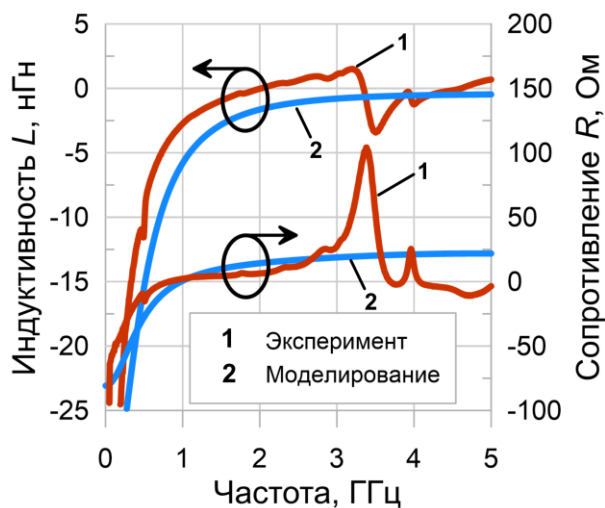
В настоящей работе демонстрируется возможность создания нефостеровского элемента, обладающего отрицательным сопротивлением и индуктивностью в широком частотном диапазоне. Для реализации нефостеровской цепи, вид макета которой представлен на рисунке 1(а), была выбрана схема однопортового преобразователя отрицательного импеданса на операционном усилителе THS4303, который обеспечивает широкую рабочую полосу частот до 1,8 ГГц.

Частотные зависимости индуктивности и сопротивления нефостеровского элемента, полученные в эксперименте и при помощи схемотехнического моделирования, представлены на рисунке 1(б). Для измерения эквивалентных сопротивления и индуктивности производилось измерение коэффициента отражения сигнала векторного анализатора цепей на входе нефостеровского элемента. Для изготовления плат использовался метод фотолитографии. Плата была изготовлена многослойной со сплошной заземляющей плоскостью в среднем слое и с коротким микрополосковым проводником в нижнем слое, обеспечивающим положительную обратную связь усилителя для минимизации паразитных эффектов.





а)



б)

Рисунок 1 – (а) – вид платы нефостеровского элемента, (б) – частотные зависимости индуктивности (левая вертикальная ось) и сопротивления (правая вертикальная ось) нефостеровской цепи

При помощи численного моделирования показана возможность применения нефостеровской цепи для согласования антенны, характеристики которой выходят за фундаментальные ограничения для пассивных материалов. Также демонстрируется применение полосковой измерительной ячейки для измерения характеристик метаматериала на основе нефостеровских элементов, которая позволяет использовать образец небольшого размера.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] L.J. Chu Physical Limitations of Omni-Directional Antennas // Journal of Applied Physics. – 1948. – V. 19. – No. 12. – P. 1163–1175.
- [2] R.F. Harrington Effect of Antenna Size on Gain, Bandwidth, and Efficiency // J. Res. Nat. Bur. Stand. – 1960. –V. 64. – No. 1. – P. 1–12.
- [3] R.M. Foster A Reactance Theorem // Bell System Technical Journal. – 1924. – V. 3. – No. 2. – P. 259–267.

**ОЦЕНКА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ  
ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩЕЙ ЧАСТИЦЫ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ  
СВЧ ПРОНИЦАЕМОСТИ КОМПОЗИТА**

**С.Н. Старостенко, А.О. Ширяев**

ИТПЭ РАН

Из публикаций [1,2] видно, что при широком диапазоне контраста свойств компонентов композита и форме частиц наполнителя, приближенной к эллипсоиду вращения, материальные параметры композита наиболее точно описываются тремя моделями смешения, а именно: Оделевского (1), Сихволы (2) и инверсно-матричной (3).

$$\chi_{32} = \frac{P}{(1-p/p_c)N + 1/\chi_{12}} \underset{\chi_{12} \rightarrow \infty}{\approx} \frac{P}{(1-p/p_c)N} \quad (1)$$

$$\frac{P(\chi_{12} - \chi_{32})}{1 + N\chi_{12} + N(p_c^{-1} - 1)\chi_{32}} = \frac{(1-p)\chi_{32}}{1 + N(p_c^{-1} - 1)\chi_{32}} \quad (2)$$

$$\chi_{32} = \frac{\chi_{12}P \left[ 1 + (1-N) \left( \frac{N(1-p_c)}{p_c(1-N)} \right) P \chi_{12}^{w(p)} \right]}{N\chi_{12}(1-p) + \left[ 1 + (1-N) \left( \frac{N(1-p_c)}{p_c(1-N)} \right) P \chi_{12}^{w(p)} \right]} \quad \text{где } w(p) = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \text{Tanh} \left[ \frac{P-p_c}{p(1-p)\delta} \right] \right\} \quad (3)$$

В этих выражениях  $\chi_{32}$  – диэлектрическая или магнитная восприимчивость смеси (эффективной среды 3),  $\chi_{12}$  – диэлектрическая или магнитная восприимчивость частицы наполнителя (компонента 1), нормированные на  $\varepsilon$  или  $\mu$  связующего (компонента 2),  $p, p_c, N, \delta$  – объемная концентрация частиц, порог перколяции (точка инверсии структуры смеси), коэффициент деполяризации и величина флуктуаций концентрации соответственно. При малой концентрации частиц ( $p \rightarrow 0$ ) расчеты (1–3) дают близкие величины восприимчивости смеси  $\chi_{32}$ , а модели оказываются неразличимы. Из этого делается вывод о том, что при высоком контрасте проницаемостей  $\chi_{12} \rightarrow \infty$  и  $p \rightarrow 0$  смесь по свойствам близка к матричной, а из её восприимчивости можно определить лишь эффективный коэффициент деполяризации  $N$ .

Целью работы является оценка действительной части  $\text{Re}[\chi_{12}]$  диэлектрической восприимчивости электропроводящей частицы. В работе показано, что при известной проводимости частицы  $\sigma$ , слабом скин-эффекте, малых относительно длины волны  $\lambda$  размерах частицы и отсутствии потерь в матрице учет комплексного характера восприимчивости частицы  $\chi_{12}$  возможен. Более того, при использовании модели смешения (1) возможен простой аналитический расчет величины  $\text{Re}[\chi_{12}]$  (4).

$$\operatorname{Re}[\chi_{12}] = \frac{\sqrt{\left(1 - 4(\operatorname{Im}[\chi_{12}](1 - p/p_c)N)^2\right) - 4(1 - p/p_c)N \times \operatorname{Im}[\chi_{12}] \frac{\operatorname{Re}[\chi_{32}]}{\operatorname{Im}[\chi_{32}]} - 1}}{2(1 - p/p_c)N} \quad (4)$$

Влияние действительной части диэлектрической восприимчивости  $\chi_{12}$  электропроводящей частицы на восприимчивость разбавленной ( $p \ll p_c$ ) смеси можно проиллюстрировать (рисунки 1 и 2) графиками зависимости тангенса угла потерь частицы  $\operatorname{tg} \delta_{incl} = \operatorname{Im}[\chi_{12}]/\operatorname{Re}[\chi_{12}]$  от тангенса угла потерь смеси [2]  $\operatorname{tg} \delta_{mix} = \operatorname{Im}[\chi_{32}]/\operatorname{Re}[\chi_{32}]$ .

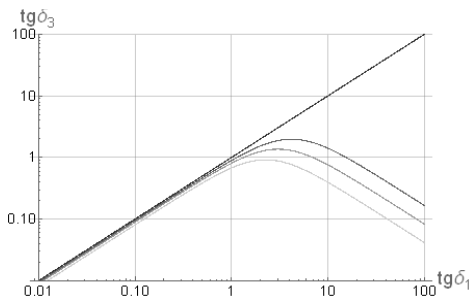


Рисунок 1 – Зависимость  $\operatorname{tg} \delta_3(\operatorname{tg} \delta_1)$  для,  $\chi_{12} = 1$

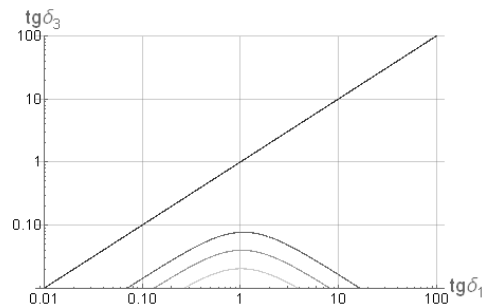


Рисунок 2 – Зависимость  $\operatorname{tg} \delta_3(\operatorname{tg} \delta_1)$  для,  $\chi_{12} = 100$

На рисунках 1,2 приведены зависимости  $\operatorname{tg} \delta_{mix}(\operatorname{tg} \delta_{incl})$  для смеси с объемной долей сферических частиц  $p = \{0.1, 0.3, 0.4, 0.6\}$  и  $p_c = 0.5$  для  $\chi_{12} = \{1, 100\}$ ; более высокая концентрация электропроводящих частиц соответствует более темной линии, превышение порога перколяции сопровождается изменением формы кривых.

Сравнение рисунков 1 и 2 показывает, что оценка величины  $\operatorname{Re}[\chi_{12}]$  возможна даже при малой концентрации частиц. Ограничением для оценки (4) является необходимость линейной зависимости  $\operatorname{Im}[\chi_{12}]$  частицы от её проводимости (5) и отсутствие потерь в матрице.

$$\operatorname{Im}[\chi_{12}] = \sigma / 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon_m \quad (5)$$

В этом выражении  $f$  – частота,  $\sigma$  – проводимость частицы,  $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ Ф/м}$ , а  $\varepsilon_m$  – диэлектрическая проницаемость связующего.

Сильный скин-эффект, резонансы на размере частицы или сопротивление контактов между частицами в кластере нарушают зависимость (5), делая аналитический расчет (4) невозможным и существенно усложняя численную оценку свойств частиц проводящего наполнителя.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] С.Н. Старостенко, К.Н. Розанов, А.Н. Лагарьков // ФММ – 2021. – Т. 122. – с. 1.
- [2] S.N. Starostenko et. al. // AIP Advances. – 2020. – V. 10. – P. 015115.
- [3] В.И.Оделевский, дисс. к.т.н. – Ленинград, 1947 – 144 с.

**ДЛЯ ЗАМЕТОК**

**ДЛЯ ЗАМЕТОК**

## СОДЕРЖАНИЕ

1. УПОРЯДОЧЕННЫЕ СОСТОЯНИЯ В МОДЕЛИ АА ГРАФЕНА С ГРУППОЙ СИММЕТРИЙ SU(4) <u>А.В. Рожков</u> , А.О. Сбойчаков, А.Л. Рахманов, ИТПЭ РАН .....	3
2. ГКР СПЕКТРОСКОПИЯ КАК МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕЗИСТЕНТНОСТИ БАКТЕРИЙ <u>Е.А. Слипченко</u> , Р.Р. Сафиуллин, К.Н. Афанасьев, М.В. Седова, И.А. Богинская, И.А. Рыжиков, Д.В. Басманов, Ю.А. Беспярых, К.А. Прусаков, А.М. Мерзликин, ИТПЭ РАН, МФТИ, НОЦ ФМН – МГТУ им. Н.Э. Баумана, ФГБУ ФНКЦ ФХМ ФМБА России, РХТУ им. Д.И. Менделеева .....	4
3. АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПРЕДОБРАБОТКИ И АППРОКСИМАЦИИ ДАННЫХ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГКР ИССЛЕДОВАНИЙ БИОЛОГИЧЕСКИ ЗНАЧИМЫХ ВЕЩЕСТВ <u>Р.Р. Сафиуллин</u> , Е.А. Слипченко, М.В. Седова, И.А. Богинская, И.А. Рыжиков, З.М. Шибзухов, А.М. Мерзликин, ИТПЭ РАН, МФТИ, НОЦ ФМН – МГТУ им. Н.Э. Баумана .	6
4. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ГКР АКТИВНЫХ ПОДЛОЖЕК ИЗ САМООРГАНИЗОВАННОГО СЕРЕБРА ДЛЯ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ 532 НМ <u>Я.Л. Поздняк</u> , К.Н. Афанасьев, М.В. Седова, И.А. Богинская, И.А. Рыжиков, А.М. Мерзликин, ИТПЭ РАН, МФТИ, НОЦ ФМН – МГТУ им. Н.Э. Баумана .....	8
5. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ТРАВЛЕНИЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ СЕРЕБРЯНЫХ ГКР ПОДЛОЖЕК ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ <u>Ю.Ю. Звягина</u> , Е.А. Слипченко, К.Н. Афанасьев, И.А. Богинская, М.В. Седова, И.А. Рыжиков, А.М. Мерзликин, ИТПЭ РАН, НОЦ ФМН – МГТУ им. Н.Э. Баумана .....	10
6. УПРАВЛЯЕМОЕ ОСАЖДЕНИЕ БИОЛОГИЧЕСКИХ АНАЛИТОВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ КАЧЕСТВЕННОГО И КОЛИЧЕСТВЕННОГО ГКР АНАЛИЗА <u>А.Р. Нигматулин</u> , К.А. Верещагин, К.Н. Афанасьев, М.В. Седова, И.А. Богинская, И.А. Рыжиков, А.М. Мерзликин, МФТИ, ИТПЭ РАН, ИОФ РАН, НОЦ ФМН – МГТУ им. Н.Э. Баумана .....	12
7. МОДИФИКАЦИЯ ЛАЗЕРНЫХ МОД НЕОДНОРОДНОЙ НАКАЧКОЙ В ВОЛОКОННОМ ЛАЗЕРЕ <u>Д.К. Высоких</u> , А.В. Дорофеев, О.В. Бутов, МФТИ, ИТПЭ РАН, ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН .....	14
8. ТРИПЛЕТНАЯ СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ И ВОЛНА СПИНОВОЙ ПЛОТНОСТИ В ДВУХСЛОЙНОМ АВ ГРАФЕНЕ <u>А.Л. Рахманов</u> , А.О. Сбойчаков, А.В. Рожков, ИТПЭ РАН .....	16

9. СОСУЩЕСТВОВАНИЕ НЕМАТИЧЕСКОЙ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ И ВОЛНЫ СПИНОВОЙ ПЛОТНОСТИ В ПОДКРУЧЕННОМ ДВУХСЛОЙНОМ ГРАФЕНЕ ПРИ МАГИЧЕСКОМ УГЛЕ ПОДКРУТКИ А.О. Сбойчаков, А.В. Рожков, А.Л. Рахманов, ИТПЭ РАН ..... 18
10. НЕТРИВИАЛЬНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ДИРАКОВСКОГО КОНУСА В  $Cd_3As_2$  С МАГНИТНЫМИ ПРИМЕСЯМИ Э.Т. Кулатов, Ю.А. Успенский, К.И. Кугель, ФИАН, ИТПЭ РАН ..... 19
11. ОСОБЕННОСТИ МАГНИТОТРАНСПОРТА НАНОКОМПОЗИТНЫХ ПЛЕНОК  $(CoFeV)_x(LiNbO_3)_{100-x}$  ВБЛИЗИ ПОРОГА ПЕРКОЛЯЦИИ В УСЛОВИЯХ ПРОЯВЛЕНИЯ ОБМЕННЫХ И СО-ТУННЕЛЬНЫХ ЭФФЕКТОВ В.В. Рыльков, С.Н. Николаев, К.Ю. Черноглазов, А.В. Ситников, А.Н. Талденков, А.Л. Васильев, А.Б. Грановский, ИТПЭ РАН, НИЦ «Курчатовский институт», ВГТУ, МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет ..... 20
12. АНИЗОТРОПНОЕ МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЕ ВЕЙЛЕВСКИХ ПОЛУМЕТАЛЛОВ В СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ А.Ш. Дотдаев, Я.И. Родионов, К.И. Кугель, Б.А. Аронзон, НИТУ МИСИС, ИТПЭ РАН, ФИАН . 23
13. УСТРАНЕНИЕ ОШИБОК КВАНТОВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОГО УРОВНЯ ШУМА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЛУБОКИХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ А.А. Жуков, В.В. Погосов, ФГУП «ВНИИА» им.Н.Л. Духова, ИТПЭ РАН, МФТИ ..... 24
14. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ АНИЗОТРОПИИ НА СВОЙСТВА ТОНКОСЛОЙНЫХ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ В.Н. Кисель, А.И. Игнатов, А.Н. Лагарьков, ИТПЭ РАН ..... 26
15. ПРИБЛИЖЁННЫЕ КРАЕВЫЕ УСЛОВИЯ НА ГРАНИЦЕ КЛИНА ВЫСОКОЙ ПРОВОДИМОСТИ М.М. Шушарин, И.Е. Могилевский, ИТПЭ РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет, каф. математики 27
16. РАДИОТЕХНИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАДИОПРОЗРАЧНЫХ ОБТЕКАТЕЛЕЙ ИЗ СТЕКЛОПЛАСТИКА К.М. Басков, В.Н. Семененко, И.И. Краснолобов, В.А. Чистяев, ИТПЭ РАН ..... 28
17. ОЦЕНКА МИНИМАЛЬНЫХ И МАКСИМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ РАССЕЯНИЯ УЗКИМИ ПОЛЫМИ ЩЕЛЯМИ К.М. Басков, И.И. Краснолобов, А.М. Лебедев, В.Н. Семененко, Т.А. Фурманова, ИТПЭ РАН ..... 30
18. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ РУПОРНОЙ КОНИЧЕСКОЙ БЕЗЭХОВОЙ КАМЕРЫ С ЛИНЗОВЫМ ОБЪЕКТИВОМ Н.П. Балабуха, Н.Л. Меньших, А.Д. Сахно, Н.Е. Шапкина, ИТПЭ РАН, МГУ имени М.В. Ломоносова, Физический факультет, каф. математики ..... 32

19. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛЯ, СФОРМИРОВАННОГО ПЛОСКОЙ ЛИНЗОЙ В МОДЕЛИ РУПОРНОЙ КАМЕРЫ  
Д.П. Королев, В.С. Солосин, Н.Л. Меньших, ИТПЭ РАН, МФТИ ..... 34
20. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУЧЕНИЯ ДВУХПОЗИЦИОННОЙ ЭПР ОБЪЕКТА ПРИ ПОМОЩИ СКАНИРОВАНИЯ НА ПЛОСКОСТИ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ  
Д.А. Коняев, Н.П. Балабуха, Н.Е. Шапкина, ИТПЭ РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет, каф. математики ..... 36
21. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТРЕХМЕРНОГО ЗЕРКАЛЬНОГО КОЛЛИМАТОРА СО СГЛАЖЕННЫМИ СКРУГЛЕННЫМИ КРАЯМИ М.И. Пропой, Ф.Б. Хлебников, Д.А. Коняев, Н.Е. Шапкина, МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет, каф. математики, ИТПЭ РАН ..... 38
22. ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ БИСТАТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДОБАВОЧНОЙ МИШЕНИ Р.В. Гильмутдинов, С.А. Федоров, Н.Л. Меньших, ИТПЭ РАН ..... 40
23. ЗАДАЧА СИНТЕЗА ПОГЛОЩАЮЩИХ СКРУГЛЁННЫХ КРАЁВ ДЛЯ ОДНОЗЕРКАЛЬНОГО ПАРАБОЛИЧЕСКОГО КОЛЛИМАТОРА  
Ф.Б. Хлебников, А.Н. Боголюбов, Н.Е. Шапкина, Д.А. Коняев, МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет, каф. математики, ИТПЭ РАН 42
24. О РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДА МОМЕНТОВ В ЗАДАЧАХ ДИФРАКЦИИ ДЛЯ ИДЕАЛЬНО ПРОВОДЯЩИХ ТЕЛ А.А. Викуловская, Д.А. Коняев, ИТПЭ РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет, каф. математики 44
25. ЭФФЕКТ ОСЛАБЛЕНИЯ ПОЛЯ В УСТРОЙСТВЕ СОЗДАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ПОМЕХИ ДЛЯ АВАРИЙНОГО ПРИЗЕМЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ «ФИЛДМАТИК»  
Л.В. Брук, Н.Л. Меньших, ИТПЭ РАН ..... 46
26. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МОНОРЕЛЬСА ТАЛИ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ  
Н.П. Балабуха, Е.В. Булычев, Н.Л. Меньших, В.С. Солосин, ИТПЭ РАН .... 48
27. ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ КОБАЛЬТА НА ДИНАМИЧЕСКИЕ МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ФЕРРОМАГНИТНЫХ ПОРОШКОВ СИСТЕМЫ  $Fe_{1-x}Co_x$ , ПОЛУЧЕННЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ СПРЕЙ-ПИРОЛИЗОМ  
А.В. Артёмова, С.С. Маклаков, А.В. Осипов, А.О. Ширяев, П.А. Зезюлина, Д.А. Петров, К.Н. Розанов, А.Н. Лагарьков, ИТПЭ РАН ..... 50
28. ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ ОДНОСЛОЙНЫХ ПЛЕНОК  $Fe_{70}Co_{30}$  НА ИХ ДИНАМИЧЕСКИЕ МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА И.В. Комаров, С.С. Маклаков, С.А. Маклаков, А.О. Ширяев, А.В. Осипов, А.Н. Лагарьков, К.Н. Розанов, ИТПЭ РАН ..... 52



29. ВОССТАНОВЛЕНИЕ СОБСТВЕННОЙ СВЧ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ФЕРРИТОВ ИЗ ИЗМЕРЕННЫХ МАТЕРИАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ <u>А.О. Ширяев</u> , К.Н. Розанов, С.Н. Старостенко, В.Г. Костишин, Д.А. Петров, А.В. Долматов, ИТПЭ РАН, НИТУ МИСИС .....	54
30. ИССЛЕДОВАНИЕ СВЧ И МАГНИТОСТАТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ NI-ZN-CO ШПИТЕЛЬНЫХ ФЕРРИТОВ <u>П.А. Зезюлина</u> , Д.А. Петров, А.О. Ширяев, Д.А. Винник, В.Е. Живулин, Д.П. Шерстюк, ИТПЭ РАН, ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» .....	56
31. ВЛИЯНИЕ УПОРЯДОЧЕННОСТИ МАГНИТНЫХ ПЛАСТИНЧАТЫХ ЧАСТИЦ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПРОНИЦАЕМОСТЬ КОМПОЗИТОВ С ПОЛИМЕРНОЙ МАТРИЦЕЙ <u>В.И. Дели</u> , А.В. Артёмова, С.С. Маклаков, А.В. Долматов, С.А. Маклаков, А.О. Ширяев, А.Н. Лагарьков, К.Н. Розанов, ИТПЭ РАН, РТУ МИРЭА .....	58
32. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАЗЦОВ С ОТРЕЗКАМИ МИКРОПРОВОДОВ ПРИ ПОВЫШЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ <u>А.А. Новиков</u> , Н.А. Бузников, Р.А. Князьков, С.С. Маклаков, Д.А. Петров, К.Н. Розанов, ИТПЭ РАН ....	60
33. ПОЛУЧЕНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ЛЕГКИХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ С ЗАДАННОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТЬЮ НА ОСНОВЕ ПЕНОПЛАСТОВ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ <u>А.В. Долматов</u> , С.Н. Старостенко, Д.А. Петров, Р.А. Князьков, С.С. Маклаков, ИТПЭ РАН .....	62
34. РАЗРАБОТКА НЕФОСТЕРОВСКОЙ ЦЕПИ С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ИНДУКТИВНОСТЬЮ <u>П.А. Иванов</u> , И.В. Стенищев, Д.А. Петров, В.И. Полозов, К.Н. Розанов, ИТПЭ РАН .....	64
35. ОЦЕНКА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩЕЙ ЧАСТИЦЫ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ СВЧ ПРОНИЦАЕМОСТИ КОМПОЗИТА <u>С.Н. Старостенко</u> , А.О. Ширяев, ИТПЭ РАН .....	66

**ДВАДЦАТЬ ПЯТАЯ ЕЖЕГОДНАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
ИТПЭ РАН**

Сборник тезисов докладов

---

Подписано в печать 04.24		Формат 60x84/16
Печать офсетная	Уч.-изд.л. 2,25	Усл.-печ.л 2,09
Тираж 100 экз.	Заказ № 47	

---

ОИВТ РАН 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2