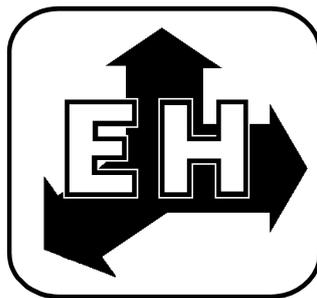


**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ПРИКЛАДНОЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИТПЭ РАН)**



**ДВАДЦАТАЯ ЕЖЕГОДНАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ИТПЭ РАН**

(Москва – 13 - 16 мая 2019 г.)

Сборник тезисов докладов

ДВАДЦАТАЯ ЕЖЕГОДНАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ИТПЭ РАН

Сборник тезисов докладов.

Под редакцией д.ф.-м.н. К.Н. Розанова – М.: ИТПЭ РАН. 2019. 66 с.

Сборник содержит тезисы докладов, представленных на Двадцатой 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 2018 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. В.Н. Кисель
д.ф.-м.н. К.Н. Розанов
к.ф.-м.н. А.Т. Кунавин
М.Е. Жукова

**ВИБРАЦИОННЫЕ НЕСТАБИЛЬНОСТИ МОЛЕКУЛ В SERS
И РАМАНОВСКОЕ ЛАЗИРОВАНИЕ: ОБЩИЕ СВОЙСТВА И РАЗЛИЧИЯ**
В. Ю. Шишков^{1,2}, Е. С. Андрианов^{2,3}, А. А. Пухов^{1,2}, А. П. Виноградов^{1,2}

¹ИТПЭ РАН

²МФТИ

³ФГУП «ВНИИА» им.Н.Л. Духова

В работе с единых позиций рассматриваются два, казалось бы, разных явления. Первое – это рамановское лазерование, а второе – это вибрационная неустойчивость молекул в поверхностно усиленном комбинационном рассеянии (SERS), обнаруженная в недавнем эксперименте [1]. Оба эти явления можно наблюдать в одной и той же постановке эксперимента: молекулы в резонаторе освещаются внешним когерентным излучением, разность между частотой внешнего поля и собственной частотой резонатора равна собственной частоте колебаний ядер в молекуле. Оба явления наблюдаются выше некоторых пороговых значений внешнего поля. Мы показываем, что эти явления имеют общую природу и проявляются в автоколебательном поведении систем. Если скорость релаксации электромагнитного поля в резонаторе намного меньше, чем скорость релаксации колебаний в молекуле, то число генерируемых фотонов в резонаторе намного больше, чем число генерируемых квантов колебаний в молекуле. Этот случай соответствует рамановскому лазеру. В противоположном случае, когда скорость релаксации электромагнитного поля в резонаторе намного больше, чем скорость релаксации колебаний в молекуле, число генерируемых фотонов в резонаторе намного меньше, чем число генерируемых квантов колебаний молекулы. Этот случай соответствует недавнему эксперименту по вибрационной неустойчивости [1]. В промежуточном случае, когда скорости релаксации электромагнитного поля в резонаторе и скорости релаксации колебаний молекулы имеют одинаковый порядок, число генерируемых фотонов в резонаторе и число квантов колебаний молекулы резко падают.

ЛИТЕРАТУРА

[1] *A. Lombardi, et al.*, Phys. Rev. X, vol. 8, 2018. P. 17.

**ВРЕМЯ ОТКЛИКА ПЛАЗМОННОГО ЛАЗЕРА
С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ
В ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ АМПЛИТУДНОЙ МОДУЛЯЦИИ**

**Н.Е. Нефедкин^{1,2,3}, А.А. Зябловский^{2,3}, Е.С. Андрианов^{2,3},
А.А. Пухов^{1,2,3}, А.П. Виноградов^{1,2,3}**

¹ИТПЭ РАН

²МФТИ

³ФГУП «ВНИИА» им.Н.Л. Духова

Проведено исследование динамики плазмонного лазера с распределенной обратной связью (DFB), который состоит из золотой пленки, перфорированной периодической решеткой отверстий и покрытой слоем активной среды, в режиме импульсной модуляции. Исследуется поведение лазера при различных размерах пятна накачки. С помощью численного моделирования лазерной динамики в рамках подхода, развитого в работе [1–2], и аналитических оценок показано, что время отклика лазера сильно зависит от диаметра пятна накачки. Эта зависимость обусловлена сложной структурой мод DFB-лазера. Взаимодействие лазерных мод с накачанной активной средой приводит к появлению единой коллективной моды, свойства которой сильно зависят от накачки. Если пятно накачки больше длины затухания электромагнитного поля в плазмонной структуре, коллективная мода локализуется внутри области накачки. Время отклика в этом случае достигает пикосекунд и немного увеличивается вместе с увеличением размера пятна накачки. В противном случае мода не локализуется внутри области накачки, и время отклика растет с уменьшением пятна. Найден оптимальный размер пятна накачки, для которого время отклика достигает минимума. Для типичных экспериментальных параметров оптимальный размер пучка накачки равен ~15 мкм, а минимальное время отклика равно ~1 пс. Полученное значение времени отклика согласуется с недавним экспериментом [3], в котором было показано, что плазмонные лазеры имеют частоту импульсной модуляции, превышающую несколько сотен ГГц. Таким образом, оптимизация размера пучка накачки позволяет увеличить скорость модуляции, а также энергоэффективность плазмонных DFB-лазерных устройств.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] A.A. Zyablovsky *et al.*, Phys. Rev. A, vol. 95, 2017. P.053835.
- [2] N.E. Nefedkin *et al.*, ACS Photonics, vol. 5, 2018. P.3031.
- [3] K.S. Daskalakis *et al.*, Nano Lett., vol. 18, 2018. P. 2658.

ОПТИЧЕСКИЙ НАНОВОЛНОВОД ТИПА “ВИТАЯ ПАРА”

**Е.Д. Чубчев¹, И.А. Нечепуренко¹,
А.В. Дорофеенко^{1,2}, А.П. Виноградов^{1,2}**

¹ФГУП «ВНИИА» им.Н.Л. Духова

²ИТПЭ РАН

Создание волноводных структур, позволяющих локализовать свет на субволновых масштабах, имеет важное значение для развития вычислительных технологий. Известные способы локализации света, такие как полное внутреннее отражение и поверхностные плазмоны не позволяют получить нужный размер моды либо из-за недостаточно больших значений диэлектрической проницаемости, либо из-за больших потерь в металле. В радиоволновом диапазоне из-за большой проводимости проводников субволновой размер моды достигается в двухпроводных линиях, таких как кабель типа “витая пара” [1]. В оптическом диапазоне создание двухпроводных линий невозможно потому, что высокая проводимость не наблюдается из-за инертности электронов. В данном докладе мы показываем, что в оптическом диапазоне возможно создание аналога кабеля типа “витая пара”. Для реализации такого волновода необходимо использовать тонкое анизотропное покрытие, у которого главные направления проводимости направлены под углом к оси волновода. При распространении моды по такому волноводу в анизотропном покрытии индуцируются токи, распределение которых похоже на распределение токов в “витой паре”. В качестве анизотропного покрытия может быть использован чёрный фосфор, при использовании которого размер моды равен $0,0025\lambda^2$. Анизотропное покрытие также может быть полностью диэлектрическим, что означает полное отсутствие потерь при распространении моды.

ЛИТЕРАТУРА

[1] *D. M. Pozar, Microwave engineering (John Wiley & Sons, 2009)*

ПЕРЕХОД ОТ НЕКОГЕРЕНТНОГО УСИЛЕННОГО СПОНТАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ К КОГЕРЕНТНОМУ ВЫНУЖДЕННОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ В БЕЗРЕЗОНАТОРНОМ ЛАЗЕРЕ

И.В. Доронин^{1,2}, А. А. Зябловский^{1,2}, Е.С. Андрианов^{1,2},
А.А. Пухов^{1,2,3}, А.П. Виноградов^{1,2,3}, Ю.Е. Лозовик⁴, А.А. Лисянский⁵

¹ФГУП «ВНИИА» им.Н.Л. Духова

²МФТИ

³ИТПЭ РАН

⁴ИСАН

⁵The Graduate Center of the City University of New York

Мы рассматриваем систему инвертированных активных атомов, помещенных в свободное пространство. В такой системе спонтанно испущенный фотон, покидая систему, вызывает индуцированное излучение дополнительных фотонов. Такое излучение принято называть усиленным спонтанным излучением (ASE). Считается, что поскольку в системе отсутствуют зеркала, и, следовательно, положительная обратная связь, то автоколебательный режим, также называемый режимом лазерной генерацией, невозможен.

В данной работе теоретически предсказан новый механизм формирования положительной обратной связи в безрезонаторной системе, состоящей из активной среды. В основе этого механизма лежит нелинейное явление затягивания частот мод свободного пространства на частоту перехода атомов активной среды. Затягивание частот приводит к появлению максимума в плотности состояний электромагнитного поля вблизи частоты перехода атомов. Т.о., излучение атомов активной среды осуществляется, в основном, на частоте этого максимума. При превышении накачкой порога генерации, из мод свободного пространства посредством взаимодействия через атомы активной среды формируется коллективная мода с заданной частотой, нулевой групповой скоростью и сильной обратной связью. Найдены параметры среды, при которых такой режим может наблюдаться в эксперименте. Численным решением системы уравнений Максвелла–Блоха с шумом [1] показано, что в рассматриваемой системе действительно существует порог генерации, характеризующийся резким ростом интенсивности выходного излучения, сужением линии выходного излучения и падением автокорреляционной функции второго порядка до единицы.

ЛИТЕРАТУРА

[1] A. E. Siegman, Lasers, University Science Books, Mill Valley, CA, 1986.

ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ РЕЖИМОВ ГЕНЕРАЦИИ ЭРБИЕВОГО ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ

А.М. Смирнов¹, А.П. Базакуца¹, Ю.К. Чаморовский¹,
И.А. Нечепуренко², А.В. Дорофеев³, О.В. Бутов¹

¹ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

²ФГУП «ВНИИА» им.Н.Л. Духова

³ИТПЭ РАН

Импульсный режим волоконных лазеров с высоким содержанием эрбия представляет большой интерес для его возможных применений в телекоммуникациях и сенсорике. В ИРЭ РАН реализованы лазеры данного типа в двух конфигурациях: лазер с распределенной обратной связью и лазер с резонатором Фабри-Перо. Созданы лазеры, которые стабильно функционируют при размере резонатора всего 50 мм. Свойства импульса, такие как амплитуда, частота и длительность, находятся в хорошем согласии с теоретическим анализом, учитывающим спонтанное излучение.

В данной работе экспериментально обнаружен и теоретически объяснен эффект теплового переключения, который состоит в переходе от импульсного режима к стационарной генерации при охлаждении лазерного резонатора до температуры жидкого азота.

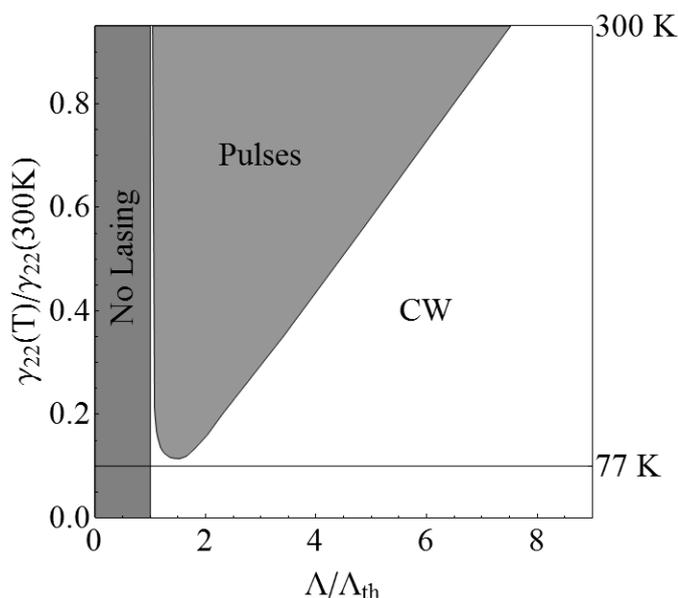


Рис. 1. Фазовая диаграмма режимов генерации эрбиевого лазера

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Sanchez F. et al. Physical Review A, vol. 48, 1993. P. 2220.
- [2] Smirnov A. M. et al. ACS Photonics. vol. 5, 2018, № 12. P. 5038.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УЛЬТРАЗВУКА ПРИ ОСАЖДЕНИИ
МИОГЛОБИНА ИЗ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ НА ГКР-АКТИВНЫЕ
ПОДЛОЖКИ С РАЗЛИЧНОЙ МОРФОЛОГИЕЙ**

**И.А. Рыжиков¹, А.Д. Аверьянова², М.В. Седова¹,
И.А. Богинская¹, К.Н. Афанасьев¹**

¹ИТПЭ РАН

²МФТИ

³ИБХФ РАН

Задача обнаружения белков в низких концентрациях сегодня решается методом гигантского поверхностно усиленного комбинационного рассеяния (ГКР), так как этот метод позволяет получать высокоамплитудные спектры подобных аналитов. Разработка специальных подложек с наноструктурированной металлической поверхностью, на которых реализуется ГКР, является важной научной задачей. Однако, для обнаружения спектров комбинационного рассеяния белка с низкой концентрацией (менее 1 мкг/мл) необходимо проводить пробоподготовку, которая обеспечивает формирование белка в такой конформации с поверхностью, при которой спектр ГКР имеет максимальную амплитуду, не разрушается структура белка и достигается необходимая концентрация аналита в зоне анализа. При этом время пробоподготовки не должно существенно увеличивать время, отведенное на анализ. Выполнение этих условий необходимо для создания оптимального способа определения белка в растворе. Метод ультразвуковой пробоподготовки на резонансной частоте позволит сократить время пробоподготовки белка.

В эксперименте использовался специально разработанный стенд для ультразвуковой пробоподготовки, состоящий из генератора, подложкодержателя, пьезоэлементов с различными резонансными частотами (690 кГц, 880 кГц, 90 кГц, 1,7 МГц), осциллографа, системы воздушного охлаждения и термопары. Водный раствор миоглобина объемом 3 мкл с концентрацией белка 1 мкг/мл был помещен с помощью пипетки переменного объема Eppendorf на подложку с наноразмерным рельефом на основе серебра. Толщина рабочего слоя серебра составляла 100 нм. Подложки были получены электронно-лучевым испарением в вакууме, с предварительным травлением стеклянной подложки в плавиковой кислоте (HF) с массовой концентрацией 18% и 36%, с различным временем травления от 1 до 5 секунд, с шагом 1 сек.

Анализ спектров высушенной пробы миоглобина проводили с помощью спектрометра на основе конфокального микроскопа WITeK на длине волны возбуждения 785 нм, мощности лазера 80 мВт.

Морфологию подложки изучали с помощью интерференционной сканирующей микроскопии, прибор Zygo New View 7200. Точные исследования показали зависимость морфологии поверхности от времени травления. Было установлено, что среднеквадратичная шероховатость растёт от 3 нм до 10 нм с увеличением времени травления.

ГКР спектры высушенного белка сравнивали с контрольными спектрами (высушенный на воздухе раствор миоглобина на аналогичных подложках на основе стекла). Было обнаружено, что использование ультразвука уменьшает время пробоподготовки в 10 раз по сравнению с обычным высушиванием на воздухе. Наблюдали рост скорости высушивания от частоты воздействия. Были обнаружены конформационные эффекты, отражающиеся в изменении спектра в сравнении с контрольными образцами, что связано с типом осаждения белка на поверхность подложки. Были определены зависимости амплитуды ГКР спектров белка от времени травления подложки и от частоты пробоподготовки. Было показано, что амплитуда спектров имеет тенденцию к росту при увеличении частоты пробоподготовки.

Эксперименты показали, что ультразвуковой испытательный стенд позволит сократить время сушки белковых растворов без повреждения образцов и позволит получить высокоамплитудные комбинационные спектры белков. Коэффициент усиления оценен в 10^4 по сравнению с контрольным экспериментом.

**РАЗРАБОТКА ПОДЛОЖЕК НА ОСНОВЕ КОМПОЗИТА
ПОЛИ-ХЛОР-П-КСИЛИЛЕНА-АГ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ЭФФЕКТА
ГИГАНСКОГО КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ**

**И.А.Богинская¹, А.Ю. Вдовиченко², А.В. Гусев¹, А.А. Гайнутдинова³,
К.А. Маилян¹, А.Е. Михайлицин¹, И.А. Рыжиков¹, М.В. Седова¹**

¹ИТПЭ РАН

²НИЦ «Курчатовский институт»

³МФТИ

Задачи детектирования биологических объектов в низких концентрациях оптическими методами, например, методом гигантского комбинационного рассеяния (ГКР) сегодня актуальны, поскольку метод характеризуется высокой чувствительностью и селективностью. Для реализации метода требуется использовать специальные ГКР-активные подложки на основе серебра или золота. Разработка перспективных подложек, реализующих эффект ГКР, является актуальной технологической задачей сегодня. Один из вариантов перспективных ГКР-активных подложек – это иммобилизованные наночастицы серебра, которые обычно используются в виде коллоидных растворов. С помощью созданной нами ранее технологии формирования металлополимерных нанокомпозитов в вакууме на охлаждаемых жидким азотом подложках можно получать покрытия с заданными оптическими свойствами и стабилизировать наночастицы [1]. Нами были созданы подложки на основе полимерной матрицы из поли-хлор-п-ксилилена, инертного полимера, известного как защитное покрытие с введенными в него наночастицами серебра. При этом на развитой морфологии полимерной матрицы формировалось покрытие из наночастиц серебра, расположенных таким образом, что порог перколяции не достигался.

В качестве прекурсора поли-хлор-п-ксилилена использовали хлор-п-циклофан. Для создания потока атомных кластеров серебра испаряли гранулированное серебро из эффузионной ячейки Кнудсена. Распыление проводили на охлаждаемые жидким азотом подложки из поликора с предварительно сформированным слоем оптически непрозрачного серебра толщиной 100 нм. Были получены две серии образцов с содержанием серебра 0 – 16 об.%. Первая серия представляла собой нанокомпозит с введенными в полимерную матрицу наночастицами серебра; вторая серия подложек представляла собой неоднородное серебряное покрытие толщиной 100 – 300 нм, сформированное на полимерной матрице и конформное к его сложной морфологии.

Полученные пленки характеризуются наличием окраски. Были

исследованы их морфологические и оптические характеристики с помощью атомно-силовой микроскопии и эллипсометрии. Было показано наличие плазмонных свойств у данных пленок.

ГКР активность пленок была проверена с помощью аналита – 5,5'-дитиобис-(2-нитробензойная кислота) кислоты (ДТНБ). Аналит представлял собой спиртовой раствор ДТНБ с концентрацией 0,2 мг/мл. Были исследованы спектры комбинационного рассеяния химически адсорбированного аналита на поверхности пленки. Были получены спектры комбинационного рассеяния, демонстрирующие значительное усиление спектра аналита по сравнению с контрольным образцом – раствором ДТНБ, до значений 10^4 , согласно оценкам, проведенным в наших предыдущих экспериментах [2].

Максимальные значения по усилению спектра показали пленки на основе нанокompозита. Однако технологически воспроизводимыми и устойчивыми являются пленки на основе покрытий серебра на полимерной матрице.

Использование отжига показало ухудшение усиливающих свойств подложек вплоть до полной деградации активности пленок.

Проведенные исследования показали, что полученные пленки являются перспективными для использования в анализах биологических объектов с помощью метода ГКР.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *K.N. Afanasev et al.* IEEE Transactions on nanotechnology., vol. 16, № 2, 2017. PP. 274-280.
- [2] *I.N. Kurochkin et.al.* Advanced Electromagnetics, vol. 3, № 1, 2014. PP. 57-60.

**МЕТОД ХАРАКТЕРИЗАЦИИ МОРФОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ
ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ
ГКР-АКТИВНЫХ ПОДЛОЖЕК**

**Б.Д. Тонанайский¹, И.А. Богинская², И.А. Рыжиков²,
М.В. Седова², И.В. Быков², Н.Д. Ушаков¹, А.Д. Аверьянова¹**

¹МФТИ

²ИТПЭ РАН

Амплитуда спектров гигантского комбинационного рассеяния биологически значимых веществ, в частности белков-биомаркеров различных заболеваний, существенным образом зависит от характеристик морфологии поверхности, на которой размещается аналит. Существующие на данный момент методы получения подложек с заданными свойствами либо являются высоко трудозатратными (пример – нанолитография), либо обладают высокой дисперсией конечных признаков подложки в зависимости от технологических параметров, что мешает получению устойчивых свойств поверхности. Актуальной задачей, в связи с этим, является выявление критически значимых характеристик поверхности и установление связи с технологическими режимами их получения.

Целью настоящей работы является разработка программного модуля для построения технологического процесса изготовления подложек типа серебро-на-стекле с заданными характеристиками. Используются данные по применению для ГКР-анализа подложек, полученных методом электронно-лучевого распыления.

Изображения образцов получены путем сканирования подложек с помощью атомно-силового микроскопа. Для каждого типа поверхности произведено пять измерений на трёх разных масштабах. Размер каждого снимка 256x256 пикселей. Всего исследовано 18 образцов, для каждого из которых было доступно от 15 до 25 АСМ-изображений.

Базовый подход основан на извлечении из изображений следующих статистических значений: среднеквадратичной шероховатости, эксцесса, коэффициента асимметрии, средней максимальной высоты профиля, среднеквадратичной волнистости, среднеквадратичной длины волны профиля, площади поверхности, радиуса эквивалентного диска, объём между нулевой плоскостью и поверхностью, объёма между поверхностью и плоскостью, проходящей через минимум зерна.

В качестве исследуемых способов характеристики поверхностей со сложной морфологией использованы методы машинного обучения. Разработан многоступенчатый алгоритм анализа АСМ-снимков серебряных подложек. Приведено сравнение результатов шаблонных методов и

значений матричных сверток, выделенных из автокодировщика на базе свёрточной нейронной сети. Для валидации результатов проведена кластеризация конечных признаков. Описательная способность извлеченных признаков проверена на соответствие полученных кластеров группам подложек, обладающих ГКР-активностью.

На основе выделенных значений обучается алгоритм кластеризации K-средних, который выделяет группы образцов со схожими параметрами. Оптимально количество групп определяется методом локтя, в котором оптимальное количество кластеров определяется как точка, в которой происходит резкое падение скорости уменьшения суммарной внутрикластерной дисперсии в зависимости от количества кластеров. В результате, при оптимальном количестве кластеров, равном 5, два кластера содержат около 80% поверхностей, обладающих ГКР-активностью. В связи с высокой дисперсией данных значений, в зависимости от параметров напыления, такого качества не достаточно для устойчивого воспроизводства свойств. Это послужило стимулом к созданию более сложной модели с использованием глубокой свёрточной нейронной сети.

Для дополнения имеющегося набора данных из каждого изображения случайным образом выделено 10–11 участков размером 64x64 пикселей так, что границы участка также имеют случайную ориентацию в диапазоне от $-\pi$ до π . Полученные элементы формируют единый набор данных для заданной текстуры. Главной особенностью подхода является анализирование участков поверхности на разных масштабах и ориентациях. В каждом изображении случайным образом выбирается 10–11 участков размера 64x64 пикселей. Всего имеется 8 типов поверхностей с различными параметрами производства.

В качестве архитектуры нейронной сети была выбрана архитектура свёрточного автокодировщика с тремя свёрточными слоями и тремя слоями максимального объединения. Свёрточные слои состоят из фильтров размера 3x3, которые центрируются поочередно на каждом пикселе исходного изображения, после чего происходит суммирование 9 значений, умноженных на коэффициенты фильтра, границы обрамляются нулями для сохранения исходной размерности. Количество фильтров равно количеству нейронов выхода свёрточного слоя. Максимальное объединение с фильтром 2x2 снижает размерность предыдущего слоя в 4 раза, путем поочередного суммирования 4 соседних элементов. В результате получен обученный внутренний слой размером 8x8 на 8 нейронов, для каждого нейрона собраны среднее, стандартное отклонение и максимум на каждом объекте (участке изображения).

Полученный набор данных размером 6000 изображений на 24

характеристики использован для обучения алгоритма K-средних аналогично подходу с базовыми признаками. Результат показал, что характеристики ГКР-активных поверхностей на 90% сконцентрированы в одном из кластеров. При этом наблюдается тонкая структура кластера, связанная с характеристиками подложек, на которых наблюдается градация уровней ГКР-сигнала. Предложенный подход позволил установить технологический режим формирования подложек серебро-на-стекле, на которых наблюдались максимальные значения амплитуды спектров миоглобина и альбумина и выявить наиболее значимые характеристики морфологии их поверхности.

МНОГОЧАСТИЧНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ПОДКРУЧЕНОМ ГРАФЕНЕ ПРИ МАГИЧЕСКОМ УГЛЕ ПОДКРУТКИ

А.О. Сбойчаков¹, А.В. Рожков¹, А.Л. Рахманов¹, Ф. Нори²

¹ИТПЭ РАН

²Center for Emergent Matter Science, RIKEN, Wako-shi, Saitama, Japan

Известно [1], что при уменьшении угла подворота слоев в подкрученном двухслойном графене, скорость Ферми дираковских конусов уменьшается и обращается в ноль при некотором, т.н. магическом угле подкрутки θ_c . Как теоретически, так и экспериментально, значение магического угла оценивается как $\theta_c \approx 1,1^\circ$. Именно для образцов с углом подкрутки, близким к этому значению, в недавних экспериментах были обнаружены моттовские диэлектрические состояния, а также сверхпроводимость. При магическом угле подкрутки низкоэнергетический спектр электронов состоит из четырех (восьми с учетом спина) почти вырожденных плоских зон. Слабая дисперсия зон делает электроны чувствительными к взаимодействию. Мы рассматриваем два параметра порядка типа волны спиновой плотности и показываем, что они снимают вырождение зон следующим образом: один параметр порядка разделяет восемь зон на два квартета, тогда как другой параметр порядка расщепляет зоны в квартетах, создавая четыре дублета. Зонная структура нетривиально зависит от уровня допирования. Это позволяет нам качественно воспроизвести [2] поведение проводимости с допированием, наблюдаемое экспериментально [3]. Рассматриваемые параметры порядка обладают нетривиальной структурой, приводящей к возникновению электронной нематичности – понижению симметрии энергетического спектра, продиктованной симметрией решетки.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] A. Rozhkov *et al.*, Physics Reports, vol. 648, 2016. P.210.
- [2] A.O. Sboychakov *et al.*, arXiv:1807.08190.
- [3] Y. Cao *et al.*, Nature, vol. 556, 2018. P.80.

**РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА И ИССЛЕДОВАНИЕ
ВЛИЯНИЯ УЛЬТРАЗВУКА И ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРА
НА ПРОБОПОДГОТОВКУ ДЛЯ КР ИССЛЕДОВАНИЯ РАСТВОРА БЕЛКА
Н.Д. Ушаков², И.А. Рыжиков^{1,2}, М.В. Седова¹, И.А. Богинская¹,
А.С. Ильин¹, Б.Д. Тонанайский², А.Д. Аверьянова²**

¹ИТПЭ РАН

²МФТИ

Пробоподготовка сложных биологических объектов, таких как белки, бактерии, вирусы для регистрации их методом поверхностно-усиленного комбинационного рассеяния на подложках, представляющих собой тонкие наноструктурированные пленки, является важной задачей, определяющей достоверность получаемых результатов. На сегодняшний день существует проблема регистрации проб белков низких концентраций (менее 1 мг/мл). Как правило, для обеспечения приближения аналита к усиливающим электромагнитное поле областям подложки и повышения его концентрации используется высушивание раствора.

При обычном высушивании аналит распределяется по поверхности кольца с диаметром, равным диаметру исходной капли (как правило, 2–3 мм) – так называемый "кофе-ринг эффект". Пробоподготовка должна обеспечивать химическую стабильность пробы и не превышать времени, заложенного на анализ. Лазерная и ультразвуковая пробоподготовка являются перспективными и актуальными методами для образцов растворов белков, поскольку позволяют уменьшить скорость высушивания, не вызывают разложение белка и обеспечивает агрегацию аналита на площади много меньше размера исходной капли, тем самым увеличивая концентрацию и уменьшая размер площади анализа.

На основании результатов исследований, полученных в предшествующий период, был разработан и изготовлен экспериментальный стенд. Он включает в себя лазерный и ультразвуковой комплекс для пробоподготовки. Предварительно проведены оценки необходимых и допустимых параметров отдельных элементов стенда, таких как мощности и частоты генераторов, температуры нагрева, требования к системе охлаждения и крепления образца, выбор микроскопа и видеокамеры.

Ультразвуковой комплекс включает в себя генератор с тремя усилителями для разных частот работы пьезоэлементов, нагреватель, охладитель и пьезодатчик для измерения конечной амплитуды ультразвуковой волны, доходящей до подложки через УЗ ванну; осциллограф с генератором SIGLENT Акип-4127/2А, переносной мультиметр с термопарой.

Лазерный комплекс включает в себя 3 диодных лазера 450, 572, 780 нм мощностью 1, 1, 6 Вт, соответственно, оптическую схему для чистки пучка, его паспортизации и завода в каплю раствора в поле зрения микроскопа. Установка позволяет изменять мощность ультразвукового и лазерного воздействия на пробу, частоту ультразвукового воздействия. Также можно поддерживать заданную температуру путем нагрева или охлаждения. Конструкция стенда предусматривает внесение изменений, согласно потребностям научной группы.

Проведена отладка и юстировка стенда. Показана возможность комплексного воздействия на образцы, включающего в себя: тепловое, лазерное и УЗ воздействия. На этапе опытной эксплуатации были проведены эксперименты по пробоподготовке раствора белка на подложках с серебряным напылением. Показано, что комбинированное воздействие ультразвука, нагрева и лазера приводит к кристаллизации белка на площадях с малым размером с уменьшением времени пробоподготовки. На обработанных пробах получены высокоамплитудные спектры КР.

МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЕ В АНИЗОТРОПНЫХ ВЕЙЛЕВСКИХ ПОЛУМЕТАЛЛАХ

Я.И. Родионов¹, К.И. Кугель¹, Ф. Нори²

¹ИТПЭ РАН

²Center for Emergent Matter Science, RIKEN, Wako-shi, Saitama, Japan

Магнитные свойства вейлевских полуметаллов (ВП) являются предметом активных исследований в настоящее время. Интерес к данной области обусловлен, прежде всего, уникальным спектром этих соединений, позволяющим наблюдать, к примеру, киральную аномалию, возникающую как раз при одновременном приложении электрического и магнитного полей, а также различные параметрические режимы поведения их магнитосопротивления [1,2]. В данном исследовании мы сконцентрировали внимание на влиянии анизотропии спектра экспериментально наблюдаемых ВП на магнитосопротивление материала.

Большинство ВП обладают приблизительной аксиальной анизотропией. Мы показываем, что наличие оси анизотропии кардинально меняет температурные свойства магнитосопротивления ВП в зависимости от взаимной ориентации тока, оси анизотропии и магнитного поля.

Мы используем стандартный для данной задачи гамильтониан:

$$H = H_0 + H_{\text{dis}}$$
$$H_0 = -i \int \psi(\mathbf{r})^\dagger \left[v_{\parallel} \sigma_{\parallel} \partial_{\parallel} + v_{\perp} \sigma_{\perp} (\partial_{\perp} + \frac{ie}{c} \mathbf{A}) \right] \psi(\mathbf{r}) d\mathbf{r}$$
$$H_{\text{dis}} = \int \psi^\dagger(\mathbf{r}) u(\mathbf{r}) \psi(\mathbf{r}) d\mathbf{r}$$

В качестве корреляционной функции потенциала беспорядка, мы выбираем сепарабельный в координатном пространстве гауссиан:

$$\sigma_{\parallel} \sim n_{\text{imp}} u_0^2 H, \quad \sigma_{\perp} \sim n_{\text{imp}} u_0^2 H T^2 / (v_f^2 p_0^2)$$

Мы полагаем, что зависимости, которые удастся получить аналитически для выбранного модельного потенциала, остаются верными и в случае произвольной корреляционной функции беспорядка.

В результате, для проводимости в ортогональном к оси анизотропии и параллельном ей направлении получены следующие формулы:

$$\langle U(\mathbf{r}) U(0) \rangle = u_0^2 \exp(-\mathbf{r}^2 p_0^2)$$

(см. рис. 1).

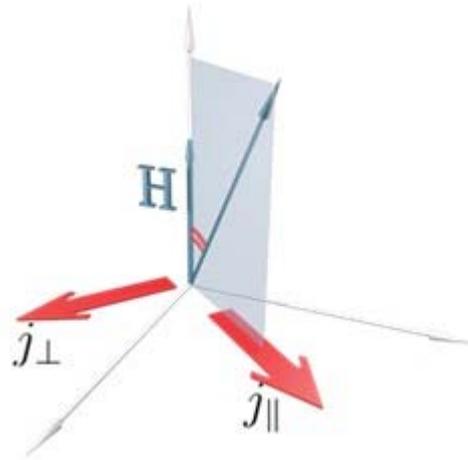


Рис.1. Геометрия магнитосопротивления

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *J. Klier, I.V. Gornyi, A.D. Mirlin*, Phys. Rev. B, vol. 92, 2015. Id. 205113.
- [2] *J. Klier, I.V. Gornyi, A.D. Mirlin*, Phys. Rev. B vol. 96, 2017. Id. 214209.

ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ НЕОДНОРОДНЫХ СОСТОЯНИЙ В СИСТЕМАХ С ВОЛНАМИ СПИНОВОЙ ПЛОТНОСТИ

А.Л. Рахманов, К.И. Кугель, А.О. Сбойчаков

ИТПЭ РАН

Исследовано влияние давления на электронные свойства и фазовое расслоение в системах с относительно слабым электрон–электронным взаимодействием, в которых имеются почти совпадающие по форме листы поверхности Ферми (т.н. неидеальный нестинг). Взаимодействие электронов этих листов поверхности Ферми приводит к формированию волны спиновой плотности (SDW). Давление смещает листы поверхности Ферми друг относительно друга, в результате чего нарушаются условия нестинга, SDW состояние становится менее устойчивым и возникает тенденция к электронному фазовому расслоению. Таким образом, вместо однородной SDW фазы возникают наноразмерные неоднородности, и система превращается в смесь SDW диэлектрика и парамагнитного (PM) металла. Форма неоднородностей оказывается зависящей от объёмной концентрации PM металла: сначала возникают нанометровые PM капли, затем цилиндры и слои. Наконец, при достаточно высоких давлениях система переходит в однородную PM фазу, см. рис. 1. Рассмотрение проводилось в рамках довольно простой модели, которая, тем не менее, позволяет описать реальную экспериментальную ситуацию в соответствующих системах, в частности, в солях Бехгарда [1].

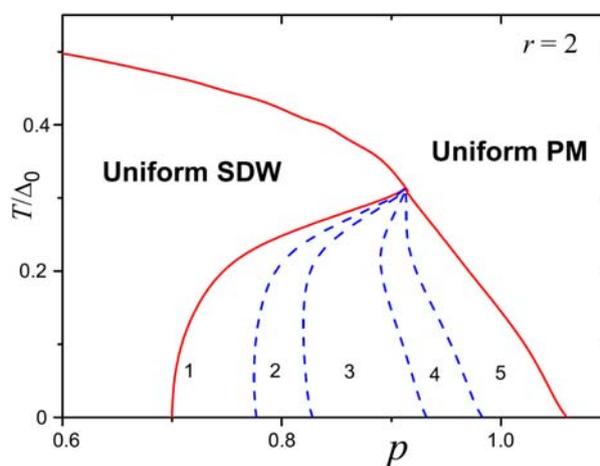


Рис. 1. Фазовая диаграмма температура – давление для системы с волной спиновой плотности (SDW). Сплошные линии отвечают границам однородных SDW и парамагнитной (PM) фаз. Штриховые линии – границы неоднородных фаз с различными типами неоднородностей: 1 – PM капли и 2 – PM цилиндры в SDW матрице; 3 – чередующиеся PM и SDW слои; 4 – SDW цилиндры и 5 – SDW капли в PM матрице.

ЛИТЕРАТУРА

[1] A. Narayanan et al., Phys. Rev. Lett., vol. 112, 2014. Id. 146401.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ НЕРАВНОВЕСНОЙ ДИНАМИКИ ВОЛНЫ ЗАРЯДОВОЙ ПЛОТНОСТИ

П.Е. Долгирев^{1,2}, А.В. Рожков^{2,3}, Б.В. Файн²

¹Harvard University, USA

²Сколковский институт науки и технологий (Сколтех)

³ИТПЭ РАН

Динамика фазовых переходов остается интересной темой исследований как для теоретиков, так и для экспериментаторов. Современные достижения в области спектроскопии с временным разрешением по схеме «возбуди-измерь» (pump-probe) позволяют наблюдать неравновесное прохождение фазового перехода, зарегистрировать появление параметров порядка, а также следить за эволюцией различных параметров системы с субпикосекундным разрешением.

В недавней работе [1] были опубликованы результаты обширных исследований неравновесной динамики волны зарядовой плотности в трителлуриде лантана, выполненных методом «возбуди-измерь». А именно, были представлены динамические данные по фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением, электронной дифракции и измерениям отражательной способности. Разрешение по времени составляло менее одной пикосекунды. В докладе будет сформулирован теоретический подход, предложенный для описания данных экспериментов. Разработанная модель состоит из двух частей. (1) Для описания динамики параметра порядка было использовано обобщение динамических уравнений Гинзбурга-Ландау на случай волны зарядовой плотности. (2) Чтобы смоделировать перераспределение энергии по различным степеням свободы исследуемого кристалла, применялась так называемая трехтемпературная модель. Для оценки свободных параметров в возникшей системе дифференциальных уравнений использовались опубликованные данные по трителлуриду лантана и трителлуридам других редкоземельных металлов. Численные симуляции данной модели позволили воспроизвести несколько важных особенностей динамики волны зарядовой плотности.

ЛИТЕРАТУРА

[1] A. Zong *et al.*, Nature Physics, vol. 15, 2019. P.27.

РЕАЛИЗАЦИЯ КВАНТОВЫХ АЛГОРИТМОВ НА ЗАШУМЛЕННЫХ КВАНТОВЫХ КОМПЬЮТЕРАХ НА ОСНОВЕ СВЕРХПРОВОДНИКОВ

В.В. Погосов^{1,2}, А.А. Жуков¹, Е.О. Киктенко³, Д.И. Бабухин^{1,3,4},
А.А. Елистратов¹, С.В. Ремизов¹, Ю.Е. Лозовик^{5,1}

¹ФГУП «ВНИИА» им.Н.Л. Духова

²ИТПЭ РАН

³РКЦ

⁴МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет

⁵ИСАН

В настоящее время наблюдается быстрый прогресс в построении квантовых вычислительных систем алгоритмического типа на основе сверхпроводниковых цепей. Создан ряд устройств, содержащих несколько десятков кубитов-трансмонов. Такие устройства еще не в состоянии опередить по производительности вычислений современные суперкомпьютеры – для этого требуется не менее 60 кубитов с улучшенными по сравнению с имеющимися характеристиками. Ведущие мировые центры разработки квантовых компьютеров нацелены на преодоление рубежа в 50-100 кубитов и определении класса задач, которые могут быть эффективно на них решены. При этом пока приходится считаться с тем обстоятельством, что данные устройства будут сильно "зашумленными" и на них будет не доступна полная коррекция квантовых ошибок. Для квантовых компьютеров данного класса принята аббревиатура NISQ - noisy intermediate-scale quantum computers (шумные квантовые компьютеры промежуточного размера).

В работе предлагаются некоторые возможные применения устройств класса NISQ, методы тестирования их производительности и выявления "узких мест", а также способы борьбы с ошибками вычислений. Предложения иллюстрируются на примере сверхпроводниковых компьютеров фирмы IBM, которые доступны через интернет в рамках облачного сервиса.

В первой части работы [1] обосновывается, что квантовые компьютеры алгоритмического типа могут использоваться для описания динамики спиновых систем вдали от равновесия. Вопрос о "термализации" замкнутой квантовой системы привлекает в настоящее время огромный интерес. Он обусловлен как важностью данной проблематики для фундаментальной науки, так и развитием области физики ультрахолодных атомов в ловушках, что позволило поставить ряд ключевых экспериментов. Использование квантовых компьютеров в качестве платформы для исследования спиновой динамики обладает определенными потенциальными преимуществами - одно и то же устройство может использоваться для симуляции самых разных спиновых систем, а также для рассмотрения релаксации с разных начальных

состояний. Эксперименты с имеющимися устройствами IBM показали, что они способны правильно описывать начальные этапы динамики и воспроизводить ключевые явления, являющиеся следствием многочастичной запутанности и квантовой интерференции. Однако ошибки квантовых операций в этих устройствах пока слишком высоки для описания последующей динамики. Предложены методы анализа данных с квантовых компьютеров для алгоритмов промежуточной длины.

Во второй части работы [2] предложено использовать протоколы квантовой криптографии для глубокого тестирования возможностей квантовых процессоров. Были реализованы хорошо известные протоколы сверхплотного кодирования информации и протокол BB84. Важной особенностью подхода является вычисление квантово-информационных характеристик, значение которых позволяет в явном виде определить, реализуется ли на практике квантовый режим или же преимуществ по сравнению с классической передачей данных нет. Показано, что имеющиеся ошибки двухкубитных операций пока слишком велики для установления квантового режима обмена информацией между удаленными кубитами процессора. Этот результат свидетельствует о том, что вместо наращивания числа кубитов целесообразней сосредоточиться на улучшении качества операций. Была выявлена еще одна проблема - паразитные связи между кубитами в процессоре, из-за которых доступное для реализации алгоритма время снижается до нескольких микросекунд вместо 50-100 микросекунд, характерных для времени декогеренции единичных кубитов в схемах. Был разработан ряд эвристических методов смягчения ошибок.

Наконец, в третьей части работы предложена квантово-классическая гибридная схема, которая может быть "обучена" для распознавания входных квантовых состояний. Реализация алгоритма на квантовом компьютере выявила превалирование неправильных исходов, вызванных ошибками операций и декогеренцией, над правильными. Тем не менее, был применен ряд приемов, связанных с постселекцией данных, которые позволили значительно улучшить результаты вычислений. Результаты свидетельствуют, что распознавание образов в данных с квантовых компьютеров класса NISQ может быть важным элементом работы с данными устройствами.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] A.A. Zhukov, S.V. Remizov, W.V. Pogosov, Yu.E. Lozovik, Quantum Inf. Process., vol. 17, 2018. Id. 223.
- [2] A.A. Zhukov, E.O. Kiktenko, A.A. Elistratov, W.V. Pogosov, Yu.E. Lozovik, Quantum Inf. Process., vol.18, 2019. Id. 31.

ПОВЕРХНОСТНАЯ И ОБЪЕМНАЯ СПИНОВАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ТОПОЛОГИЧЕСКОГО ИЗОЛЯТОРА

Р.Ш. Акзянов^{1,2}, А.Л. Рахманов¹

¹ИТПЭ РАН

²МФТИ

Исследована спиновая проводимость топологического изолятора с учетом как поверхностных, так и квазидвумерных объемных электронных состояний в этой слоистой системе [1]. Использовано низкоэнергетическое разложение гамильтониана до третьего порядка по оператору импульса. Слагаемые третьего порядка вызывают так называемые гексагональные искажения поверхности Ферми и приводят к возникновению недиагональных компонент тензора электрической [2] и спиновой проводимости [1]. Вычисления проводились в формализме типа Кубо с учетом вершинных поправок, которые существенно перенормируют скорость Ферми для гамильтонианов интересующего нас типа [2]. В отличие от электрической проводимости, в спиновую проводимость дают вклад не только состояния на поверхности Ферми, но и электроны из заполненных зон. Показано, что для типичных значений параметров изотропная часть спиновой проводимости больше, чем анизотропная. Особое внимание было уделено исследованию так называемых «геликоидальных» состояний, в которых электроны на поверхности Ферми имеют одинаковую проекцию спина на направление импульса. В таком режиме вклад в спиновую проводимость от состояний на поверхности Ферми существенно возрастает. Нами показано, что объемная спиновая проводимость мало чувствительна к беспорядку, если постоянная спин-орбитального взаимодействия значительно больше, чем характерная энергетическая характеристика беспорядка (амплитуда рассеяния). Если амплитуда рассеяния больше постоянной спин-орбитального взаимодействия, то объемная спиновая проводимость подавляется. Спиновая проводимость поверхностных состояний топологически защищена. Поэтому она почти не зависит от химического потенциала и степени беспорядка. Вклад в спиновую проводимость от поверхности того же порядка, что и от электронов в объеме в пересчете на один слой. Полученные результаты качественно согласуются с экспериментом.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *R.S. Akzyanov, A.L. Rakhmanov*, Phys. Rev. B, vol. 99, 2019. Id. 045436.
[2] *R.S. Akzyanov, A.L. Rakhmanov*, Phys. Rev. B vol. 97, 2018. Id. 075421.

СПИНОВЫЕ ВОЛНЫ В ДВОЙНОЙ ЦЕПОЧКЕ МАГНИТНЫХ ЧАСТИЦ

А.М. Пикалов^{1,2}, А.В. Дорофеенко³, А.Б. Грановский¹

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет

²ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

³ИТПЭ РАН

В разных областях физики – плазмонике, оптике и радиофизике – изучается возможность передачи информации с помощью наноразмерных волноводов. В радиофизике волнами-переносчиками сигнала являются электромагнитные волны, в плазмонике – плазмоны. В магнетизме в качестве таких переносчиков рассматриваются спиновые волны – коллективные колебания магнитных моментов. Недавно была показана возможность распространения спиновой волны в цепочке магнитных частиц [1] – по аналогии с волнами в цепочках металлических наночастиц или радиочастотных резонаторов [2,3].

В данной работе рассмотрены спиновые волны в более сложной системе – магнотном волноводе, состоящем из двух параллельных цепочек магнитных частиц. Показано, что вследствие взаимодействия между цепочками происходит расщепление разрешенной зоны (см. рис. 1) с образованием двух распространяющихся мод – симметричной и антисимметричной. Интерференция этих мод – а также зависимость положения разрешенной зоны от внешнего магнитного поля – делает возможным использование такой системы для создания магнотного фильтра или переключателя.

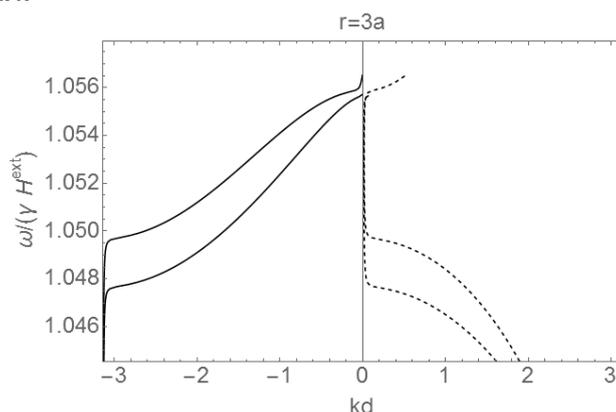


Рис. 1. Дисперсионные кривые магнонов в двойной цепочке магнитных частиц

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Pike N. A. et al. The European Physical Journal B., vol. 90, 2017 № 3. P. 59.
- [2] Pikalov A. M. et al. Physical Review B. vol. 98, 2018 № 8. P. 085134.
- [3] Shamonina E. et al. Electronics letters. vol. 38, 2002 № 8. P. 371-373.

ИЗМЕРЕНИЕ МАТЕРИАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СПЕЧЕННЫХ ФЕРРИТОВ

$Zn_{1-x}Ni_xFe_2O_4$ В ДИАПАЗОНЕ 0,04–10 ГГц

Д.П. Лелюк¹, К.Н. Розанов¹, Д.А. Петров¹, П.А. Зезюлина¹,
С.Н. Старостенко¹, А.Ю. Стариков², В.Е. Живулин², Д.А. Винник²

¹ИТПЭ РАН

²Южно-Уральский государственный университет

Ni-Zn ферриты со структурой шпинели широко используются в различных технических применениях СВЧ диапазона [1]. Электрические и магнитные свойства ферритовой керамики сильно зависят от особенностей ее микроструктуры. В данной работе исследованы материальные параметры спеченных методом одностадийного твердофазного синтеза Ni-Zn ферритов при различном содержании никеля.

Исследованные образцы спеченных ферритов состава $Zn_{1-x}Ni_xFe_2O_4$ ($x=0...1$ с шагом 0,1) были выполнены в форме коаксиальных шайб, имеющих толщину от 4,7 до 9,6 мм, внутренний радиус 1,5 мм и внешний радиус 3,5 мм. Измерения действительной и мнимой частей СВЧ магнитной ($\mu'+i\mu''$) проницаемости образцов были проведены в полосе частот от 0,04 до 10 ГГц в коаксиальной линии методом Николсона–Росса–Уира.

При содержании никеля $x \leq 0,3$ в исследуемом частотном диапазоне наблюдается отсутствие магнитных свойств. При $x > 0,3$ в образцах появляются пики магнитных потерь на частотах от 70 МГц до 1,2 ГГц, причем с увеличением значения x пик μ'' сдвигается от низких частот к более высоким, см. рис. 1.

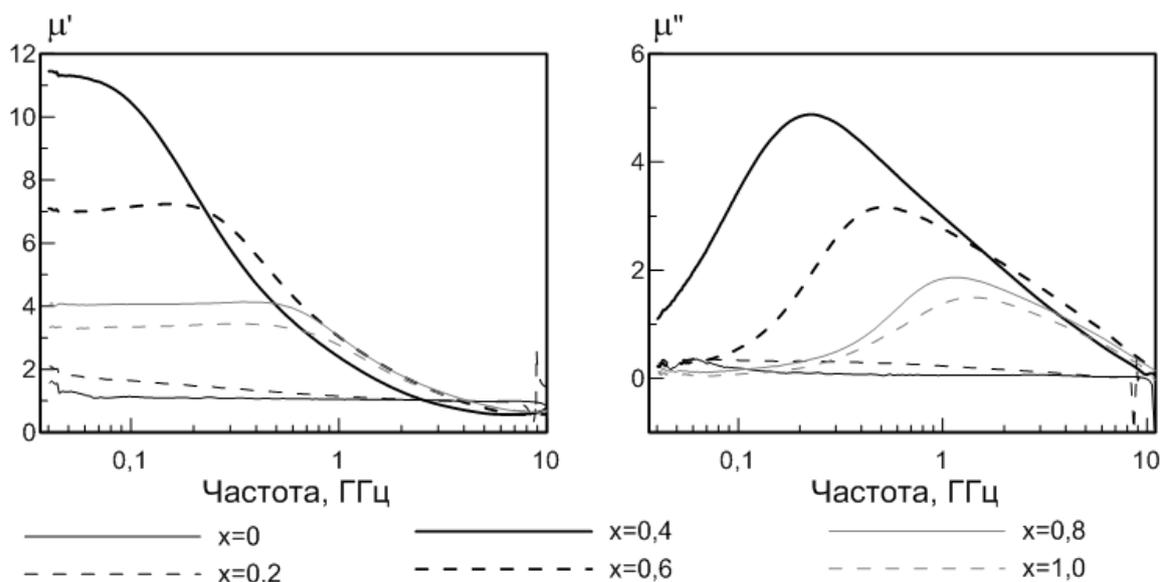


Рис. 1. Измеренные частотные зависимости магнитной проницаемости образцов состава $Zn_{1-x}Ni_xFe_2O_4$ с содержанием никеля от 0 до 1,0

По результатам измерений были оценены значения константы Снука исследуемых ферритов, $S=(\mu_{ст}-1)f_{рез}$, где $\mu_{ст}$ – статическая магнитная проницаемость, $f_{рез}$ – частота, на которой расположен пик магнитных потерь. Полученные значения константы Снука лежат в диапазоне от 2 до 3 ГГц, что является типичным значением для шпинельных ферритов.

Благодаря наличию достаточно высоких магнитных потерь в дециметровом диапазоне длин волн исследованные ферриты могут быть использованы в качестве эффективных поглотителей электромагнитных волн для данного диапазона.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *M. Atif, M.Nadeem.* J Sol-Gel Sci Technol, vol.72, 2014. P. 615.

ВАРИАЦИИ УСЛОВИЙ СИНТЕЗА ОБОЛОЧКИ SiO₂ НА ПОВЕРХНОСТИ ЧАСТИЦ МАГНИТНЫХ ПОРОШКОВ

**А.В. Долматов^{1,2}, С.С. Маклаков¹, П.А. Зезюлина¹, Д.А. Петров¹,
А.В. Осипов¹, А.С. Набоко¹, С.А. Маклаков¹, А.Н. Лагарьков¹**

¹ИТПЭ РАН

²МФТИ

Ранее было показано, что сплошной антикоррозионный слой SiO₂, присутствующий на поверхности железных порошков, снижает действительную (ϵ') и мнимую части диэлектрической проницаемости в композитах с диэлектрической матрицей [1]. Представляет интерес установление связи между свойствами оболочки SiO₂ на поверхности железа и эффективными электродинамическими характеристиками композитов железо-парафин и железо-полимер. Химическое осаждение оболочки SiO₂ на *нано*-частицы железа, проводимое в спирто-аммиачной среде по процессу Штобера, широко исследовано и опубликовано. Отчётов по исследованию осаждения SiO₂ на *микро*-частицы железа в мало. На свойства продукта реакции гидролиза простого эфира (TEOS), по которой образуется SiO₂, можно воздействовать двумя способами. Первый способ состоит в изменении температуры и длительности реакции. Второй способ заключается в изменении механизма реакции через смещение кислотно-основного равновесия в реакционной смеси.

Обнаружено, что изменение длительности реакции влияет на толщину образующегося слоя SiO₂. При этом, в отличие от хорошо известного процесса Штобера, в котором образуются индивидуальные частицы SiO₂ однородного размера, присутствие железа в исследуемой реакции нарушает однородность скорости роста. Толщина образующейся оболочки SiO₂ прямо пропорционально длительности реакции. За полчаса гидролиза образуется слой SiO₂ толщиной 90 нм. За 4 часа этот слой увеличивается до 190 нм. Разброс толщин слоя на отдельных железных частицах в эксперименте по варьированию времени достигал 40 нм. Количество индивидуальных частиц SiO₂, образующихся вместе с оболочкой на поверхности железа, не зависит от времени реакции. Локальный элементный анализ показывает, что время реакции не влияет и на отношение SiO_{3.35}. Этот же анализ регистрирует увеличение элементного содержания кремния в расчёте на железо: 10%, 14%, 17% (что соответствует 15.5 масс.% «SiO₂»), 20% при времени реакции 0.5, 1, 2 и 4 часа, соответственно. По выполненным ранее оценкам, привес продукта в результате синтеза при [TEOS]/[NH₃] = 0.34 и длительности процесса 2 часа, составляет 5 ± 2%. При варьировании длительности процесса соотношение эфира к аммиаку поддерживали равным [TEOS]/[NH₃]

= 0.34. Результаты элементного анализа завышены по содержанию SiO_2 относительно железа из-за особенностей метода.

Изменение условий гидролиза влияет не только на толщину оболочки, но на количество индивидуальных частиц SiO_2 , структуру и состав оболочки. При этом, скорость роста слоя SiO_2 на поверхности железных частиц разного размера существенно однороднее, чем в случае варьирования длительности процесса: максимальный разброс толщин оболочек в рамках одного синтеза не превышает 20 нм. Толщина оболочки составляет 30 нм при соотношении $[\text{TEOS}]/[\text{NH}_3] = 1.5$ и возрастает до 220 нм при $[\text{TEOS}]/[\text{NH}_3] = 0.25$. SiO_2 , полученный в более кислой среде (большее значение $[\text{TEOS}]/[\text{NH}_3]$), обладает сильно развитой шероховатой поверхностью. Покрытие, полученное в более щелочной среде, обладает более гладкой поверхностью, но содержит большее количество индивидуальных частиц SiO_2 . Гидролиз в более кислой среде приводит к избытку кислорода в продукте: $\text{SiO}_{8.62}$, $\text{SiO}_{4.23}$, $\text{SiO}_{3.81}$, $\text{SiO}_{3.35}$ и $\text{SiO}_{3.05}$ при $[\text{TEOS}]/[\text{NH}_3]$ 1.5, 0.75, 0.5, 0.34, 0.25. Содержание кремния в расчёте на железо при этом увеличивается от 1.7%, 6%, 7%, 17% до 18% в том же ряду.

Оболочка SiO_2 при всех исследованных толщинах предотвращает электрические контакты между металлическими частицами порошка в композите с парафином. Уменьшение ϵ' композитов за счёт возникновения слоя SiO_2 не зависит от толщины слоя при неизменности состава $\text{SiO}_{3.35}$. Для сферических частиц железа снижение ϵ' составляет ~10% при частоте 1 ГГц и содержании наполнителя 30 об.%. Величина мнимой части магнитной проницаемости (μ'') ведёт себя аналогично, уменьшение μ'' составляет ~15% при 10 ГГц при том же составе композита. При варьировании условий гидролиза ϵ' композитов оказалось тем меньше, чем больше в составе « SiO_2 » избыток кислорода. Максимальное снижение ϵ' в этом случае составило ~15%. Величина μ'' уменьшается обратно пропорционально избытку кислорода в составе оболочки и достигает ~30% при $[\text{TEOS}]/[\text{NH}_3] = 0.25$.

По совокупности полученных данных можно сделать вывод о том, что с увеличением длительности реакции происходит медленный рост толщины оболочки, образовавшейся в первые 10–15 минут от начала процесса, при этом состав оболочки не меняется и существенного прироста веса продукта реакции не происходит. Такой метод не придаёт частицам $\text{Fe}@SiO_2$ новых свойств. Варьирование условий гидролиза позволяет варьировать толщину оболочки в более существенном диапазоне, при этом изменяется её состав и вес продукта реакции. Этот подход позволяет изменять величину ϵ' композита $\text{Fe}@SiO_2$ с диэлектриком даже при сферической форме железных частиц. Отклонение состава оболочки SiO_x от SiO_2 вызвано, в первую очередь, присутствием гидроксильных групп, и связано с развитостью

поверхности.

Исследуемый метод нанесения SiO₂ опробован на железных порошках сферической и пластинчатой формы, на железных порошках со вкраплениями диэлектрика, на порошках Co и FeCo. Во всех случаях основным признаком появления оболочки служит устранение электрических контактов между частицами. Для некоторых несферических частиц возникновение оболочки позволило снизить ϵ' на 90% при неизменной величине μ'' . В ряде других случаев появление оболочки позволило расширить максимум магнитных потерь композита с несферическими железными частицами в высокочастотную область. Проведённые исследования говорят о необходимости дальнейшей разработки методики модифицирования магнитных порошков для тонкой настройки электродинамических характеристик итоговых композитов.

ЛИТЕРАТУРА

[1] S.S. Maklakov *et al.* // J. Alloys Compds, vol. 706? 2017. PP. 267-273

СВЧ ИССЛЕДОВАНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК СУПЕРМАЛЛОЯ ВО ВНЕШНЕМ ПОСТОЯННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

А.О. Ширяев, С.Ю. Бобровский, П.А. Зезюлина,

А.С. Набоко, Д.А. Петров, К.Н. Розанов

ИТПЭ РАН

Разработан метод исследования магнитных характеристик материалов с помощью измерений СВЧ магнитной проницаемости в коаксиальной линии при приложении внешнего постоянного магнитного поля. Метод позволил найти намагниченность насыщения, поле анизотропии, поле магнитострикции и фактор затухания тонких ферромагнитных пленок [1]. Экспериментальные исследования показали, что поля анизотропии в ряде случаев могут различаться для образцов, вырезанных из пленки в двух взаимно перпендикулярных направлениях, см. рис. 1. Однако поле анизотропии – это характеристика материала, которая не должна зависеть от направления.

Исследование посвящено поиску причин этого эффекта. Исследуемые пленки изготовлены методом магнетронного напыления супермаллоя на гибкую лавсановую подложку. Образцы представляют собой вырезанные из пленки и склеенные между собой полосы шириной 5 мм, которые скручены в рулон под размер коаксиальной линии 7/3 мм. Суммарная длина полосы составила около 180 см. Исследована зависимость магнитных характеристик от толщины образца и длины полосы. Показано, что при уменьшении длины полосы, значения полей анизотропии для образцов, вырезанных в перпендикулярных направлениях, сближаются, см. рис. 2, что говорит о наличии между слоями образца магнитного взаимодействия через размагничивающие поля.

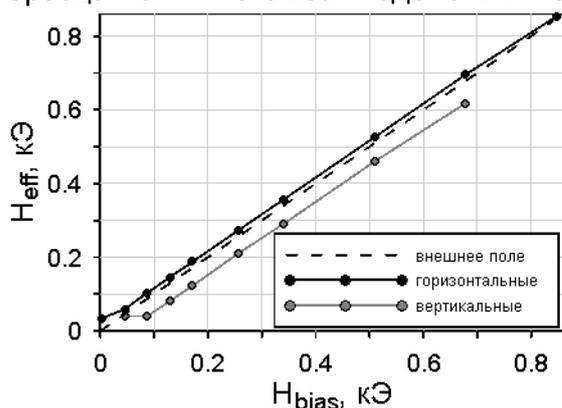


Рис. 1. Зависимость эффективных полей от внешнего магнитного поля

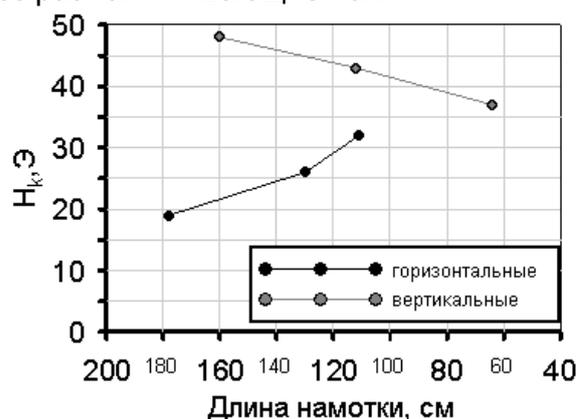


Рис. 2. Зависимость найденных полей анизотропии от длины полосы

ЛИТЕРАТУРА

[1] A.O. Shiryayev et al., J. Magn. Magn. Mater., vol. 477, 2019. PP.329–333.2019.

РАЗРАБОТКА ПЕРЕКЛЮЧАЕМЫХ СВЧ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ ТОНКИХ ПЛЁНОК VO₂

**В.И. Полозов^{1,2}, С.С. Маклаков¹, С.А.Маклаков¹, Л.А. Алексеева¹,
А.С. Набоко¹, Д.А. Петров¹, А.Д. Мишин¹, К.М. Басков¹, В.Н. Кисель¹**

¹ИТПЭ РАН

²МФТИ

Современные СВЧ-переключатели создаются на основе электромеханических реле, PIN-диодов, полевых транзисторов или микроэлектромеханических систем (МЭМС). Несмотря на длительное совершенствование переключателей на основе этих технологий, ни одна из них пока не может быть использована для создания переключателя, который одновременно имел бы высокое быстродействие (~1 нс или менее), вносил бы низкие потери в тракт в открытом состоянии, обладал бы высокой изоляцией в закрытом состоянии, допускал бы использование высокой мощности сигнала при низкой мощности управления и выдерживал бы большое (более 10⁹) количество переключений. Переключатель, удовлетворяющий этим требованиям, может быть создан на основе тонких плёнок VO₂.

Отличительной особенностью тонких (толщиной 100–300 нм) плёнок VO₂ является наличие у них перехода диэлектрик-металл, который может быть инициирован нагревом этих плёнок до температуры порядка 60°C или приложением электрического поля напряженностью 10⁶ В/м. Наиболее высокой амплитудой и крутизной перехода обладают плёнки, полученные в эпитаксиальном процессе. Поверхностное сопротивление таких плёнок в диэлектрическом низкотемпературном состоянии составляет ~10⁴ Ом/□, а в высокотемпературном проводящем состоянии – ~1 Ом/□. Время перехода составляет при этом 200 фс. Однако, для промышленного использования плёнок VO₂ необходимо применение более простого метода синтеза, чем эпитаксиальный рост.

Нами применен двухстадийный метод синтеза, включающий ВЧ реактивное магнетронное распыление мишени из V на подложку из поликристаллического Al₂O₃ при температуре ~400°C и отжиг в токе Ag при температуре более 700°C. В результате оптимизации параметров каждой стадии синтеза были получены поликристаллические плёнки VO₂ толщиной 120 нм с отношением сопротивлений плёнок в диэлектрическом (при 30°C равно 3,5·10⁵ Ом/□) и металлическом состояниях (при 80°C равно 220 Ом/□) $R_s/R_m=1600$. Переход происходит при 53°C. Площадь поверхности плёнок составляет 30 см². Плёнки обладают высокой однородностью свойств по всей площади.

Такие плёнки могут быть использованы в качестве управляемого СВЧ экрана или переключаемого элемента микрополосковой линии, поскольку обладают хорошей адгезией к подложке, что позволяет проводить их обработку методами химического травления или наносить поверх них другие тонкоплёночные покрытия. Прототипы как управляемого частотно-селективного СВЧ экрана, так и СВЧ переключателя для микрополосковой линии были созданы на полученных плёнках при помощи фотолитографии с последующим химическим травлением и lift-off процессом. Минимальный размер сформированных элементов составляет 10 мкм, что позволяет использовать для инициирования перехода управляющее напряжение ~20 В.

Измерены коэффициенты прохождения и отражения экрана и переключателя в открытом и закрытом состояниях. Параметры СВЧ переключателя рассмотрены в диапазоне частот 0.1–18 ГГц. В полосе частот 0.1–3 ГГц разница между коэффициентом прохождения в открытом и закрытом состояниях (изоляция) составляет 30 дБ. На частотах выше 3 ГГц изоляция постепенно уменьшается до 5 дБ, что не связано со свойствами плёнки и вызвано дефектами тестового микрополоска. Параметры СВЧ экрана рассмотрены на допустимых частотах, соответствующих геометрическим размерам экрана, в диапазоне 9–20 ГГц. В каждом случае экран имеет изоляцию ~8 дБ.

Реализованный двухстадийный процесс позволяет получать тонкие плёнки VO_2 с высокой амплитудой перехода диэлектрик-металл. Хорошая адгезия плёнок допускает формирование на них структур микрометровых размеров. Сохраняющаяся после процесса фотолитографии высокая амплитуда перехода, который может быть инициирован как приложением электрического напряжения, так и нагревом, позволяет использовать указанные структуры в таких микроэлектронных приложениях как управляемые СВЧ-экраны или СВЧ-переключатели.

ПРОБЛЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ СВЧ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ В КОРОТКОЗАМКНУТОЙ МИКРОПОЛОСКОВОЙ ЯЧЕЙКЕ

С.Ю. Бобровский, Д.А. Петров, К.Н. Розанов, С.Н. Старостенко

ИТПЭ РАН

Известно множество различных способов измерения СВЧ магнитной проницаемости материалов: измерения в свободном пространстве, прямоугольном волноводе, коаксиальной линии и др. Измерения в микрополосковой ячейке имеют ряд преимуществ: отсутствие ограничения со стороны низких частот, отсутствие жестких требований к размерам и форме образца, относительная простота реализации. Однако, в процессе калибровки такой линии возникает ряд проблем, например, возникновение высших мод, несогласованность коаксиально-волноводного перехода, сложный расчет фактора размагничивания, влияние зазоров и др. Как правило, при измерении используются короткозамкнутые открытые микрополосковые ячейки с шириной зазора порядка миллиметра. При этом измеряются образцы поперечным размером много больше ширины микрополоска и в то же время достаточно тонкие, например, ферромагнитные пленки. В этом случае нормировки измеренных данных на результат измерения пустой диэлектрической подложки оказывается достаточно. В работах [1, 2] сделана попытка учета влияния неоднородности поля на результат измерения, в работе [3] предложен метод калибровки линии с помощью двух эталонных образцов.

В данной работе проведен теоретический и экспериментальный анализ нескольких известных методик калибровки микрополосковой линии, а также изучено влияние размагничивания на измерения магнитной проницаемости. С помощью численного расчета показано, что корректный учет размагничивания образца, а также помещение образца в область однородного поля позволяют существенно увеличить точность измерений.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *J. Svacina*, IEEE Microw. Guided Wave Lett., vol. 2, no. 10, 1992. P. 385–387.
- [2] *Y. Wu, Z. Tang, Y. Xu, B. Zhang, X. He*, IEEE Trans. On Magn., vol. 46, no. 3, 2010. P.886.
- [3] *S.N. Starostenko, K N. Rozanov, and A.V. Osipov*, J. Appl. Phys., vol.103, 2008. P. 07E914.

**ПРИМЕНЕНИЕ КОРОТКОЗАМКНУТЫХ СТАНДАРТОВ
ДЛЯ КАЛИБРОВКИ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ВОЛНОВОДА**

Д.А. Петров, К.Н. Розанов

ИТПЭ РАН

В последнее время прямоугольные волноводы всё реже применяются для измерения СВЧ материальных параметров образцов. Происходит это по причине ряда особенностей прямоугольных односвязных волноводов — ограничения распространения электромагнитных волн в области низких частот и возможности распространения волн высших типов в высокочастотной области (частота, на которой возможно распространение высших мод, обычно значительно ниже, чем для соизмеримой коаксиальной линии). Эти факторы существенно сужают полосу частот, в которой возможно корректное использование прямоугольных волноводов при измерении СВЧ материальных параметров. Также, важной особенностью является наличие продольной компоненты поля для основной рабочей моды.

Эти особенности ограничивают применимость прямоугольных волноводов в качестве измерительных линий. Тем не менее, существует ряд ситуаций, делающих их единственным практичным вариантом. В отличие от коаксиального волновода, где поляризация распространяющейся волны вырождена, в прямоугольном волноводе возможно исследование анизотропных материалов, с анизотропией в плоскости образца. Также, сами образцы могут быть в форме параллелепипеда, и тогда использование коаксиального волновода может быть затруднено. В отличие от коаксиального волновода, при использовании прямоугольного волновода есть возможность исследовать магнитные материалы во внешнем поле при параллельном направлении внешнего постоянного и переменного СВЧ поля.

Во всех тех случаях, где по тем или иным причинам использование прямоугольного волновода обосновано, необходима калибровка измерительной линии.

Проблемой калибровки линий с использованием прямоугольных волноводов является то, что нет возможности реализовать калибровочный стандарт холостого хода, однако с лёгкостью реализуется стандарт режима короткого замыкания (КЗ). В данной работе исследована возможность применения калибровки коэффициента отражения измерительного порта прямоугольного волновода с использованием трёх КЗ нагрузок с разной электрической длиной.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПИЛОНА С ОБЪЕКТОМ ИЗМЕРЕНИЯ НА ТОЧНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ

Н.П. Балабуха, Н.Л. Меньших

ИТПЭ РАН

Для определения значения эффективной площади рассеяния (ЭПР) объекта сложной формы необходимы экспериментальные исследования. Объект при этом помещается на малоотражающее опорно-поворотное устройство (ОПУ) – пилон [1]. Но малое значение ЭПР пилонa еще не гарантирует высокую достоверность измерений, т.к. имеется взаимодействие пилонa и других элементов конструкции с объектом измерения.

Целью данной работы является оценка точности измерений при учете вклада переотражений между ОПУ и объектом в измеренное значение ЭПР, а также способы уменьшения ошибки измерений. Отличие падающей волны от плоской для относительно небольших эталонных объектов не приводит к значимым ошибкам и в данной работе не рассматривается.

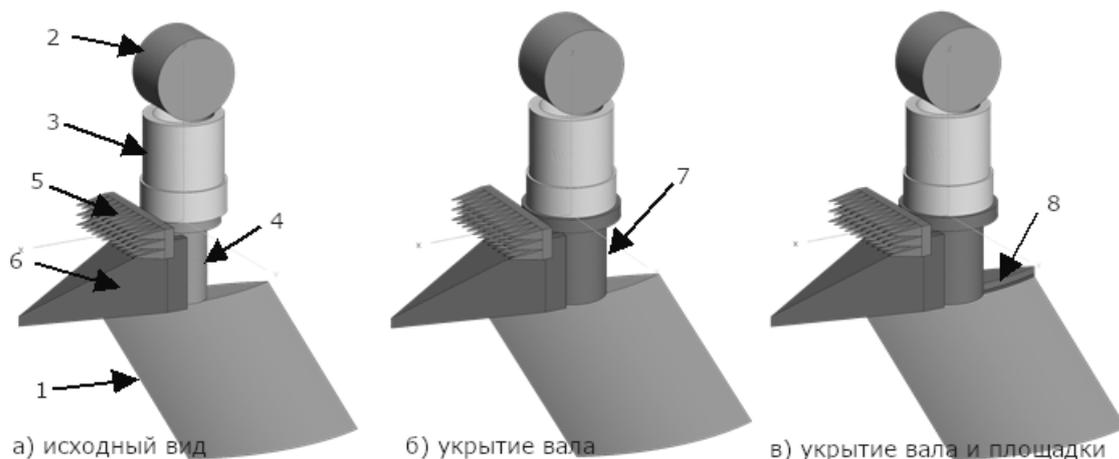


Рис. 1. Верхняя часть пилонa с укрытием и с эталонным цилиндром.

Очевидно, что взаимодействие между пилонem и объектом зависит от объекта. Рассмотрим в качестве объекта горизонтально расположенный цилиндр. На рис. 1 представлена исследуемая часть измерительной установки с объектом измерения. Она состоит из пилонa (1), объекта измерения (2), пенопластовой подставки (3), поворотного вала (4), укрытия в виде пирамидального (5) и клиновидного (6) радиопоглощающих материалов (РПМ). Рассматривались конфигурации с укрытием поворотного вала плоским РПМ (7) и укрытие задней площадки пилонa (8).

Математическое моделирование измерения ЭПР цилиндра проводилось методом моментов с помощью программы FEKO. Рассматривалось падение

плоской волны на цилиндр, расположенный на ОПУ, и измерялось ЭПР в обратном направлении для нескольких положений цилиндра по углу азимута. Результаты сравнивались с точным расчетом ЭПР цилиндра в свободном пространстве. Значения диэлектрических проницаемостей всех используемых РПМ известны на рассматриваемых частотах.

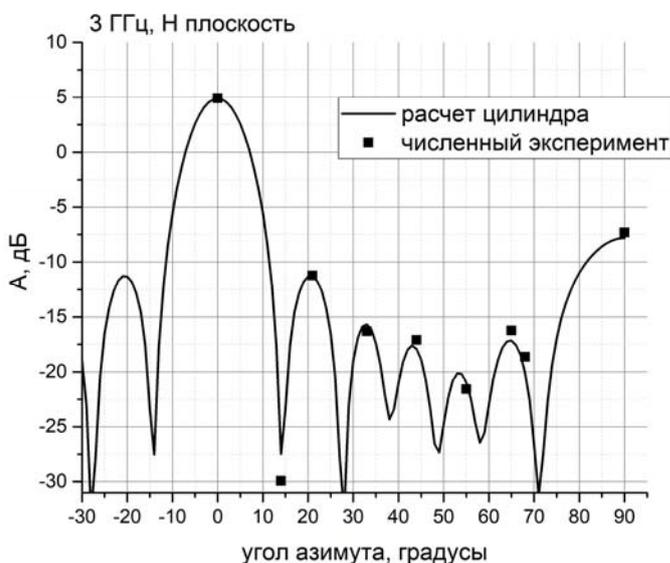


Рис. 2. Диаграмма обратного рассеяния цилиндра в свободном пространстве и при численном эксперименте

Результаты расчета показали, что, во-первых, взаимодействие с ОПУ вызывает относительно небольшую погрешность «измеренных» значений ЭПР цилиндра. Это видно из диаграммы обратного рассеяния, представленной на рисунке 2. А во-вторых, укрытие вала верхней части пилона РПМ позволяет увеличить точность измерений. Металлический вал вносит погрешность порядка 0,5 дБ для ЭПР боковой поверхности рассматриваемого цилиндра (-7,8 дБм²), в то время как ОПУ с валом, покрытым РПМ позволяет уменьшить ошибку измерения до 0,1 дБ. Так же исследования показали, что задняя площадка пилона практически не вносит дополнительных погрешностей при измерении ЭПР объекта.

Отметим, что, используя данную модель, можно также оптимизировать форму переднего укрытия вала верхней части пилона для каждого типа объектов измерения.

ЛИТЕРАТУРА

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

МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ ДВУХПОЗИЦИОННОЙ ЭПР ПО ПОЛЮ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ

Н.П. Балабуха¹, Д.А. Коняев^{1,2}, Н.Е. Шапкина^{1,2}

¹ИТПЭ РАН

²МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет, каф. Математики

Нахождение *эффективной поверхности рассеяния* (ЭПР) различного рода тел актуально как с точки зрения теории [1–6], так и практики радиолокации [7–10]. При этом в последнее время наряду с классическими однопозиционными ЭПР исследователи всё чаще интересуются двухпозиционными диаграммами ЭПР [1–10].

Получение диаграмм ЭПР можно проводить различными способами. Для измерения этой характеристики объекта можно использовать как открытые полигоны [3, 9, 10], так и компактные полигоны – специально оборудованные помещения относительно небольших размеров [3, 9, 10]. Также требуемые характеристики можно получить, прибегнув к математическому моделированию дифракции электромагнитной плоской волны на объекте исследования, что даёт возможность получить результаты с достаточно высокой степенью точности [11]. Однако существующих на сегодняшний день вычислительных ресурсов недостаточно для получения диаграмм ЭПР сложных практически важных объектов. В таком случае эффективным подходом к получению диаграмм ЭПР является измерение электромагнитного поля в ближней зоне при помощи компактного полигона и последующее вычисление необходимых полей в дальней зоне средствами математического моделирования [1–6].

На практике измерения электромагнитного поля в ближней зоне исследуемого объекта в компактных полигонах производятся при помощи плоских, цилиндрических или сферических сканеров [10]. По результатам этих измерений вычисляются рассеянное поле и диаграмма ЭПР исследуемых объектов.

Пересчёт электромагнитного поля, заданного на цилиндрической поверхности, во внешнюю по отношению к этой поверхности область можно осуществить различными способами. Во-первых, можно воспользоваться формулами Стрэттона-Чу [11, 12], что сводит задачу к численному интегрированию вектор-функций. Во-вторых, можно применить другой классический метод, который основан на разложении поля, заданного на цилиндрической поверхности, по цилиндрическим волнам и последующем вычислении полей в дальней зоне [2, 4–6]. Достоинством последнего способа является возможность нахождения поля в дальней зоне лишь по двум компонентам поля, заданным на поверхности. Кроме того, при таком подходе

учёт влияния измерителя является хорошо исследованной задачей [2]. Однако, на практике часто требуется нахождение диаграмм ЭПР лишь в небольшом диапазоне изменения бистатических углов. Естественным желанием в таком случае является уменьшение затрат, связанных с измерениями. А именно, желательно максимально уменьшить размеры области сканирования, сохранив при этом приемлемую точность результатов. В работах [4–6] предложен способ уменьшения ошибок, возникающих вследствие усечения области сканирования.

В данной работе моделируется получение двухпозиционных диаграмм ЭПР и измерение поля в ближней зоне в случае сканирования по усеченной сферической поверхности на примере дифракции на идеально проводящем конечном цилиндре. В качестве метода пересчёта электромагнитного поля в дальнюю зону используется метод, описанный в работе [6]. Здесь, в отличие от классического подхода, предлагается раскладывать поле по специальным образом сконструированной системе векторных функций, ортогональных не только на сфере, но и на её используемом участке – области сканирования [6].

Для нахождения ЭПР объектов, а также электромагнитных полей во всей области, внешней по отношению к объекту, необходимо решить математическую задачу дифракции [11]. В работе для решения такого рода задач и вычисления поля в ближней зоне используется программный комплекс FEKO.

Результаты расчётов показывают, что двухпозиционная диаграмма ЭПР может быть получена путём пересчёта поля, измеренного в ближней зоне рассеивателя на ограниченном участке сферической поверхности при отсечении остальной её части. На рисунке 1 представлен пример вычисления двухпозиционной диаграммы ЭПР(φ) идеально проводящего цилиндра, ось которого наклонена на 45° относительно направления на источник (на рисунке 0°) в положительном направлении отсчёта. Центр масс цилиндра находится в начале отсчёта. Размеры цилиндра: высота $\sim 2,25$ м; радиус $\sim 0,75$ м. Частота падающего излучения 400 МГц. Поверхность сканирования – участок сферической поверхности радиуса 2,5 м, $\theta \in [45^\circ; 135^\circ]$, $\varphi \in [0^\circ; 180^\circ]$. Угол φ меняется в плоскости содержащей ось цилиндра и волновой вектор падающей волны. Из рисунка видно, что метод, предложенный в работе [6] в рассмотренном случае, даёт возможность получать результат с более высокой точностью.

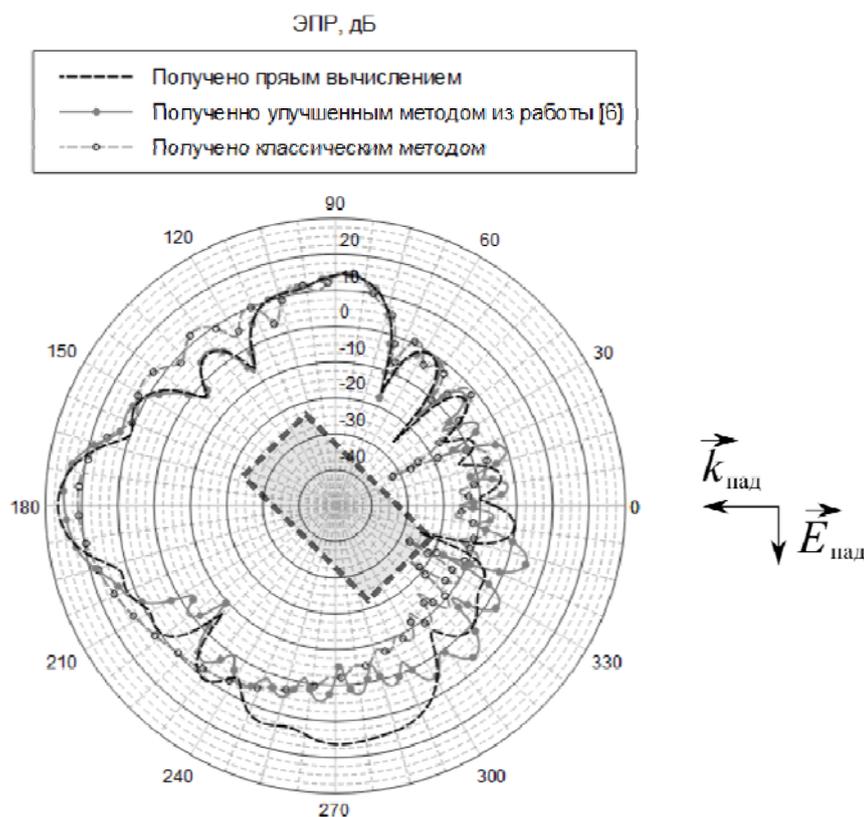


Рис. 1. Пример сравнения диаграмм ЭПР, полученных двумя рассмотренными способами, с диаграммой, вычисленной напрямую программным комплексом FEKO

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *T.B.Hansen et al.* Bistatic RCS calculations from cylindrical near-field measurements – Part I: Theory //IEEE transactions on antennas and propagation, Т. 54, № 12, 2006. С. 3846-3856.
- [2] *W.M. Leach* Probe Compensated Near-Field Measurements on a Cylinder. Ph.D. dissertation, School of Electrical Engineering, Georgia Institute of Technology, USA, 1972.
- [3] *E.F. Knott* Radar cross section measurements. Springer Science & Business Media, 2012.
- [4] *K.T. Kim* Truncation-error reduction in 2D cylindrical/spherical near-field scanning //IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Т. 58, № 6, 2010. С. 2153-2158.
- [5] *KT. Kim* Truncation-error reduction in spherical near-field scanning using slepian sequences: Formulation for scalar waves //IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Т. 59, № 8, 2011. С. 2813-2823.

- [6] *K.T. Kim* Slepian transverse vector spherical harmonics and their application to near-field scanning //2011 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI), IEEE, 2011. С. 2138-2141.
- [7] *R.A. Marr et al.* Bistatic RCS calculations from cylindrical near-field measurements — Part II: Experiments //IEEE transactions on antennas and propagation, Т. 54, № 12, 2006. С. 3857-3864.
- [8] *K.T. Kim* Validation of the Slepian approach to truncation-error reduction in spherical near-field scanning //Proceedings of the 2012 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation, IEEE, 2012. С. 1-2.
- [9] *Балабуха Н.П., Зубов А.С., Солосин В.С.* Компактные полигоны для измерения характеристик рассеяния объектов, Наука, 2007.
- [10] *Бахрах Л.Д.* Методы измерений параметров излучающих систем в ближней зоне, Наука, Ленинградское отд-ние, 1985.
- [11] *Ильинский А.С., Кравцов В.В., Свешников А.Г.* Математические модели электродинамики [Учеб. пособие для вузов], Высш. шк, 1991.
- [12] *Стрэттон Дж.* Теория электромагнетизма, Т. 1, Гостехиздат, 1948.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЯ ШИРОКОПОЛОСНОЙ РУПОРНОЙ АНТЕННЫ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ

**С.А. Федоров, Н.Л. Меньших, В.С. Солосин, А.А. Политико,
В.Н. Семененко, В.А. Чистяев, Е.В. Булычев**
ИТПЭ РАН

При разработке широкополосных измерительных комплексов различного назначения является актуальным применение рупорных линзовых антенн с коньковым переходом, работающих в широкой полосе частот СВЧ-диапазона [1]. В данной работе исследуются возможности модернизации линзовой рупорной антенны типа П6-23А с целью уменьшения неравномерности поля в ближней зоне (БЗ) электромагнитного поля.

Рассматриваемая антенна используется в составе стенда, предназначенного для измерения радиофизических параметров образцов материалов и покрытий, в том числе для определения диэлектрической и магнитной проницаемостей материалов. При проведении измерений исследуемый образец помещается в окно круглой металлической диафрагмы диаметром 180 мм, которая устанавливается на расстоянии около 40 см от плоскости апертуры приемопередающей антенны П6-23М [2]. Измеряются комплексные коэффициенты отражения и прохождения (S-параметры) образца. Таким образом, образец всегда находится в ближней зоне рупорной антенны для всего диапазона частот от 2 до 23 ГГц. Погрешность измерения параметров материалов по методике [2] во многом определяется неравномерностью распределения амплитуды и фазы «квазиплоского» поля в области позиционирования образца, которое, несмотря на наличие фазокорректирующей линзы, отличается от идеального поля плоской волны. Кроме того, сама диафрагма с нанесенным на нее радиопоглощающим материалом (РПМ) также вносит искажения в распределение поля в области позиционирования образца. Влияние этих факторов на равномерность распределения поля в рабочей зоне измерительного стенда исследовалось в данной работе.

С помощью двухкоординатного сканера были проведены измерения амплитудно-фазового распределения поля на расстояниях 40—120 см от апертуры антенны. Для расстояния 40 см также проводились исследования распределения поля вблизи диафрагмы. На рис. 1 представлен вид измерительной установки для измерения распределения поля. Исследования проводились для нескольких модификаций антенн типа П6-23А: без линзы, с линзой и антенны с системой радиопоглощающих материалов и покрытий.

По результатам измерений выявлено, что антенна с установленной

линзой на частотах от 3 до 14 ГГц в рабочей зоне имеет неравномерность распределения фазы меньше, чем $\pm 20^\circ$, и неравномерность амплитуды ± 3 дБ. Диафрагма сужает рабочую зону, однако размер области с приемлемой неравномерностью остается удовлетворительным.

На частотах выше 14 ГГц ситуация меняется. В БЗ антенны колебания распределения амплитуды поля достигают 10 дБ, фазы – до 60° . С увеличением расстояния от антенны поле заметно выравнивается и при расстоянии порядка 80 см распределение поля имеет приемлемую неравномерность на частотах ниже 18 ГГц.

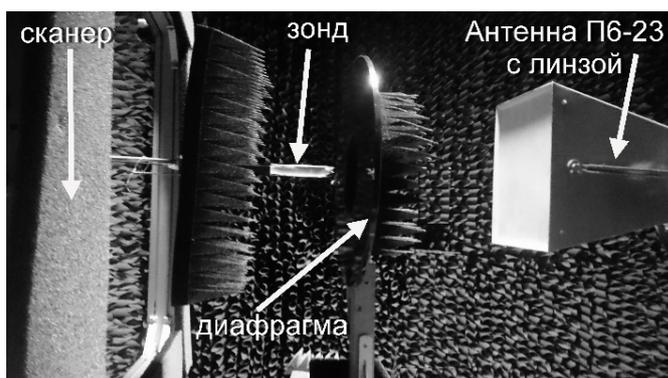


Рис.1. Вид измерительной установки

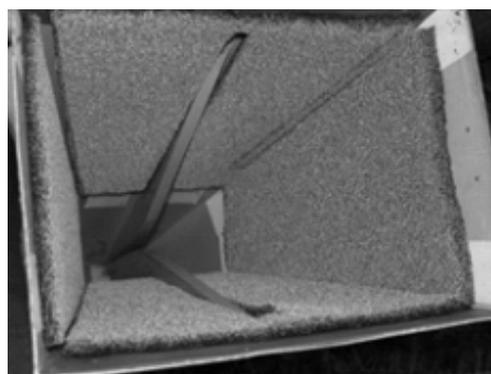


Рис.2. Модифицированная антенна П6-23А (показана без линзы)

Дополнительно с целью улучшения радиотехнических характеристик антенны была проведена ее модернизация путем нанесения на стенки рупора РПМ и покрытий. Нанесение РПМ и покрытий на стенки рупора позволяет уменьшить дифракционные эффекты на кромках раскрыва и сформировать более равномерное поле в БЗ антенны. Исследования проводились для нескольких вариантов схем установки РПМ: 1) только с магнитоэлектрическим покрытием на основе модифицированного железа толщиной 0,7 мм; 2) с магнитоэлектрическим покрытием, на который дополнительно устанавливался листовой РПМ на основе полупроводящего пенополиуретана толщиной 10 мм. Один из вариантов модернизированной антенны П6-23А представлен на рис. 2.

На рис. 3 представлены результаты измерения распределения поля на частоте 19 ГГц для исходной антенны П6-23А с линзой и модернизированной антенны. Двумерная картина поля показывает, что антенна П6-23А имеет большую неравномерность в распределении амплитуды поля на 40 см от плоскости апертуры антенны. Модификация антенны позволила получить единую зону с приемлемой неравномерностью амплитуды и фазы поля.

В результате работы показано, что нанесение системы РПМ и

покрытий на внутренние стенки рупора позволяет существенно снизить неравномерность поля в ближней зоне рупорной антенны, а значит, позволит улучшить точность измерения параметров материалов.

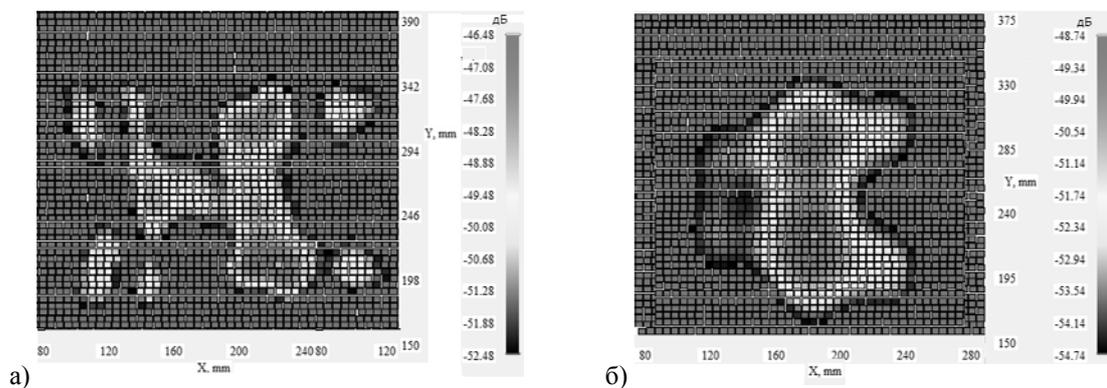


Рис.3. Распределение амплитуды поля в БЗ антенны П6-23А с линзой (а) и модифицированной антенны (б) на частоте 19 ГГц

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Балабуха Н.П., Зубов А.С., Солосин В.С. Компактные полигоны для измерения характеристик рассеяния. М.: Наука, 2007.
- [2] Семенов В.Н., Чистяев В.А., Политико А.А., Басков К.М. Стенд для измерения в свободном пространстве радиофизических параметров материалов в сверхширокой полосе сверхвысоких частот. // Измерительная техника. №2, 2019.

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЙ ДИАГРАММ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ

Н.П. Балабуха, Е.В. Булычев, А.С. Зубов, Н.Л. Меньших, А.В. Никитенко
ИТПЭ РАН

Автоматизированный измерительный комплекс – компактный полигон (АИК-КП) разработанный и реализованный в ИТПЭ РАН является уникальным средством радиотехнических измерений, в том числе измерений характеристик рассеяния объектов сложных форм. Уникальность заключается как в размере рабочей зоны коллиматора, которая представляет собой горизонтально расположенный цилиндр длиной 8,0 метров и диаметром 6,0 метров, так и в параметрах генерируемых электромагнитных полей плоской волны в диапазоне частот от 1,0 до 18,0 ГГц. В рабочей зоне отклонение амплитуды в диапазоне частот от 1,0 до 2,0 ГГц не превышает $\pm 1,5$ дБ, в диапазоне частот от 2,6 до 18,0 ГГц не превышает $\pm 1,0$ дБ, отклонение фазы в диапазоне частот от 1,0 до 18,0 ГГц не превышает ± 10 град. Здесь 0 дБ соответствует величине эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) в 1 м^2 . Для измерения и контроля распределения полей в рабочей зоне применяется специально предусмотренный высокоточный четырехкоординатный сканер с точностью позиционирования (среднеквадратичное отклонение) по координатам не хуже 0,3 мм и повторяемостью позиционирования $\pm 0,05$ мм. На рис. 1 в качестве примера приведены результаты сканирования электромагнитного поля в рабочей зоне коллиматора на частоте 9,0 ГГц, где неравномерность поля в рабочей зоне составляет $\pm 0,9$ дБ по амплитуде и $\pm 5,4$ град по фазе.

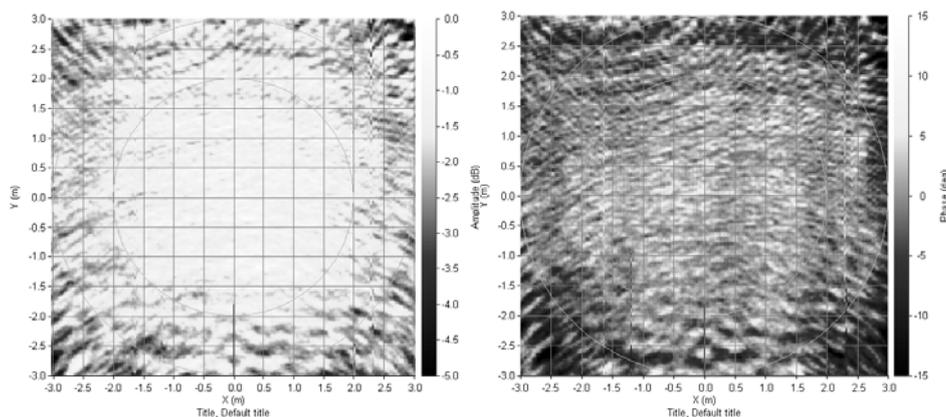


Рис. 1. Результаты сканирования распределения амплитуды и фазы в рабочей зоне коллиматора МАРК-12 на частоте 9.0 ГГц

Комплекс АИК-КП позволяет проводить измерения последовательно в шести диапазонах частот без значительных затрат времени на замену облучателей и последующих калибровок, непременно связанных со снятием

и установкой на опорно-поворотное устройство (ОПУ) объекта измерений. Особенности микроволновой измерительной системы и специально разработанного программного обеспечения делают процесс измерений быстрым и информативным. Чтобы оценить точности измерений были проведены измерения эталонного кругового цилиндра значительной длины характеристики которого, в свою очередь, можно рассчитать теоретически с высокой точностью. Был изготовлен круговой цилиндр длиной 1498 мм и диаметром основания 118 мм, с высокими допусками на форму и качество поверхности. Цилиндр такого протяженного размера взаимодействует с различными точками рабочей зоны, удаленными друг от друга на значительное расстояние и таким образом малейшие неравномерности электромагнитного поля плоской волны очень сильно будут влиять на значения измеренных параметров. Радиус основания цилиндра размером от 0,5λ до 2,5λ находящийся в резонансной области так же накладывает жесткие требования к точности измерений [2].

Погрешность измерения характеристик рассеяния складывается из погрешностей измерения амплитуды и фазы измерительными приборами, входящими в состав измерительной схемы комплекса, неравномерностями амплитуды и фазы поля в рабочей зоне, наличие кросс-поляризованной компоненты поля, погрешностей изготовления, аттестации и измерения эталонных отражателей, взаимодействия объекта с опорно-поворотным устройством, погрешности позиционирования, погрешности установки частоты [1].

Наиболее важным фактором является выбор малоотражающей опоры. Поэтому были проведены подготовительные работы для выбора наиболее лучшей опоры с минимальными уровнями обратного рассеяния.

Теоретические расчеты ДОР проведены с помощью программы FEKO методом моментов для фиксированных частот: 2,8, 3,1, 3,4, 4,5, 4,8, 5,1, 8,6, 9,2, 9,7, 10,0, 14,4, 15,0, 15,6 ГГц.

Результаты измерений цилиндра подтвердили высокую точность полученных результатов. Для боковой поверхности цилиндра при падении волны по нормали к образующей на большинстве частот ошибка составила в 0,4 дБ. Для случая нормального падения волны на основание цилиндра ошибка не превысила 1,0 дБ, кроме частоты 2,8 ГГц при горизонтальной поляризации, где ошибка составила 1,3 дБ. Так же было получено отличное совпадение боковых лепестков ДОР с точностью $\pm 2,0$ дБ вплоть до уровней обратного рассеяния минус 30 дБм².

В таблице 1 представлены в виде дроби погрешности измерений ЭПР цилиндра при нормальном падении волны на его боковую поверхность (значение в числителе) и основание (значение в знаменателе).

Таблица 1. Значения погрешности измерения цилиндра

Частота, ГГц	2.8		3.4		5.1		8.6		10.0		14.4		15.6	
	V	H	V	H	V	H	V	H	V	H	V	H	V	H
Погрешность измерений, дБ	<u>0.1</u>	<u>0.1</u>	<u>-0.2</u>	<u>0.1</u>	<u>-0.3</u>	<u>-0.4</u>	<u>-0.1</u>	<u>-0.1</u>	<u>-0.1</u>	<u>-0.1</u>	<u>0.6</u>	<u>0.2</u>	<u>0.1</u>	<u>0.1</u>
	0.2	1.3	0.0	-0.1	0.3	0.3	0.5	0.4	0.5	-0.1	1.0	0.8	0.3	0.5

Пределы погрешности измерений характеристик обратного рассеяния объектов, проводимых на АИК-КП ИТПЭ РАН, не превышают допустимых значений согласно описанию типа средств измерений (свидетельство об утверждении типа средств измерений RU.E.35.018.B № 50584).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Балабуха Н.П., Зубов А.С., Солосин В.С. Компактные полигоны для измерения характеристик рассеяния. М.: Наука, 2007.
- [2] Кобак В.О. Радиолокационные отражатели. М.: «Сов. радио», 1975.

ШИРОКОПОЛОСНЫЕ ВОЛНОВОДНЫЕ СОГЛАСОВАННЫЕ НАГРУЗКИ НА ОСНОВЕ ФЕРРОЭПОКСИДА

**В.Н. Семенов, К.М. Басков, Д.И. Акимов, А.А. Политико,
В.А. Чистяев, А.Ю. Зарубина**

ИТПЭ РАН

В настоящей работе представлены численные исследования электродинамических свойств согласованных нагрузок с радиопоглощающими вставками трёх форм из радиопоглощающего материала (РПМ) на основе ферроэпоксида. Расчёты проведены в диапазонах частот трёх волноводов WR-159, WR-112 и WR-90, что составило диапазон частот от 4,8 до 12 ГГц. Малые значения коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВн) согласованных нагрузок достигаются выбором эффективного РПМ, а также оптимальных размеров и формы вставок из этого РПМ.

Расчёты КСВн согласованных нагрузок проведены для трёх видов форм вставки из РПМ: клин, пирамида, экспоненциальный клин. Оптимизация геометрических размеров клина из магнитного РПМ происходит численно с помощью пакета программ электродинамического моделирования FEKO. Расчёт параметра S_{11} порта в расчётной модели осуществляется методом моментов. Для вычисления оптимальных геометрических размеров каждой из форм вставки из РПМ используется встроенная в программу FEKO процедура оптимизации, которая осуществляется в FEKO симплекс-методом.

Используемый в расчетах РПМ типа РАН-89 изготавливается из ферроэпоксида, основными компонентами которого являются модифицированное карбонильное железо, эпоксидная смола и реологические добавки. Значения диэлектрической и магнитной проницаемостей РПМ, представленные на рисунке 1, определены с помощью методики измерений [1]. РПМ обладает низкой степенью пористости, высокой однородностью и воспроизводимостью электрофизических свойств.

Вычисленные частотные зависимости КСВн согласованных нагрузок, содержащих вставки из РПМ разных видов форм, представлены на рис. 2. Из полученных результатов исследований поглощающих вставок видно, что в волноводных согласованных нагрузках наибольшей эффективностью обладают радиопоглощающие вставки из ферроэпоксида в форме экспоненциального клина. На практике чаще применяются вставки из РПМ в форме обычного клина, которые при оптимально подобранных геометрических размерах также обеспечивают низкие уровни КСВн у волноводных согласованных нагрузок.

Показано, что разработанный РПМ на основе ферроэпоксида РАН-89 обладает высокой эффективностью для изготовления радиопоглощающих вставок в волноводных согласованных нагрузках, что позволяет достичь низких значений КСВн в широком диапазоне частот. По предварительным оценкам, максимальная рассеиваемая мощность в волноводных нагрузках с ферроэпоксидом типа РАН-89 составляет порядка нескольких ватт.

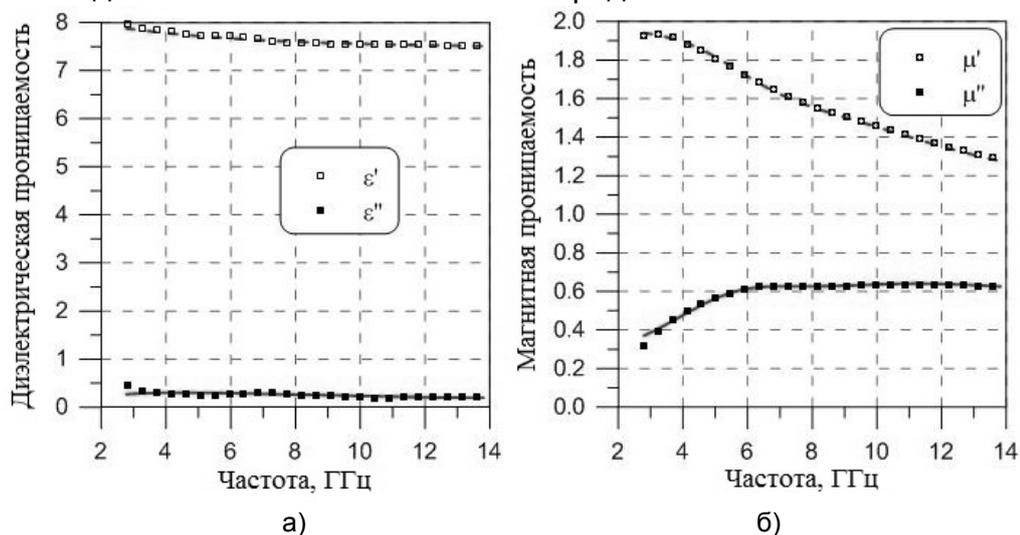


Рис. 1. Измеренные частотные зависимости комплексных диэлектрической (а) и магнитной (б) проницаемостей ферроэпоксида типа РАН-89

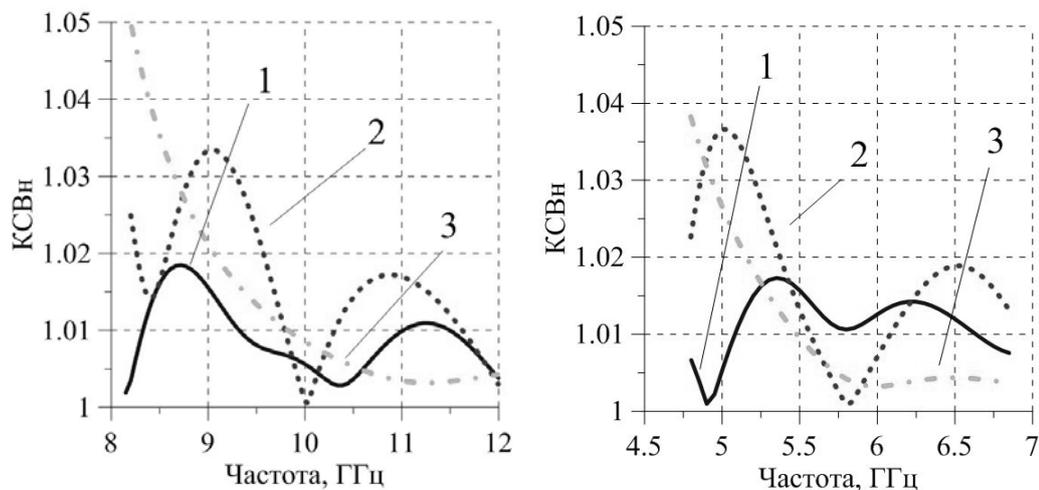


Рис. 2. Рассчитанные частотные зависимости КСВн согласованных нагрузок для типов волноводов WR-159 (слева) и WR-90 (справа) с радиопоглощающими вставками различных форм (1 – экспоненциальный клин, 2 – клин, 3 – пирамида) с оптимальными геометрическими параметрами

ЛИТЕРАТУРА

[1] Семененко В.Н., Чистяев В.А., Политико А.А., Басков К.М. Стенд для измерения в свободном пространстве радиофизических параметров материалов в сверхширокой полосе сверхвысоких частот. // Измерительная техника, №2, 2019.

**ИЗМЕРЕНИЕ УГЛОВЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ КОЭФФИЦИЕНТОВ
ПРОПУСКАНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ**

**К.М. Басков, А.А. Политико, В.Н. Семенов, В.А. Чистяев,
И.И. Краснолобов, Д.И. Акимов
ИТПЭ РАН**

При проектировании радиопрозрачных укрытий (РПУ), экранов и других изделий радиотехнического назначения важно иметь возможность проводить измерения угловых зависимостей коэффициентов пропускания (КП) конструкционных материалов, из которых выполнена стенка этих изделий, в широкой полосе частот СВЧ-диапазона. В ИТПЭ РАН разработан специализированный комплекс, позволяющий проводить высокоточные измерения угловых зависимостей КП плоских образцов материалов и конструкций в частотном диапазоне от 2 до 24 ГГц [1].

В качестве примера проведены измерения угловых зависимостей КП пятислойной конструкции, которая может служить стенкой РПУ.

При проведении измерений исследуемый образец помещается в окно круглой металлической диафрагмы диаметром 180 мм, расположенной в ближней зоне рупорных антенн. Габаритные размеры образца должны составлять не менее 1200×400 мм для того, чтобы минимизировать вклад от процессов дифракции на краях образца. Изменение угла наклона образца происходит автоматически, при этом производится запись зависимости коэффициента пропускания образца от угла падения электромагнитной волны при фиксированных частотах, а также частотных зависимостей коэффициента пропускания при различных углах наклона образца. Измерение и контроль угла подъема образца осуществляются с помощью аналогового инклинометра и аналого-цифрового преобразователя. Запись и первичная обработка результатов измерений производится с интервалом 5 град в автоматизированном режиме. На рис. 1 представлены частотные зависимости коэффициента пропускания пятислойного образца конструкционного материала, измеренные по вышеприведенной методике в диапазоне частот 2 до 24 ГГц при углах падения волны от 0 до 70 градусов. Для более наглядного представления на указанном графике приведены кривые с шагом 10 град.

Оценка точности полученных результатов измерений проведена расчетным путем. Для этого были определены электродинамические параметры пяти слоев образца (значения диэлектрической проницаемости и толщины) по измеренным S-параметрам при нормальном падении волны. Процедура подбора электродинамических параметров слоев образца основана на минимизации методом Коши целевой функции, которая

представляет собой зависимость от параметров многослойной структуры невязки между измеренными и вычисленными в широкой полосе частот значениями коэффициентов отражения (КО) и пропускания. Целевая функция имеет следующий вид:

$$F(\vec{x}, \vec{y}) = \frac{1}{(f_K - f_H)} \int_{f_H}^{f_K} \left[\left| \frac{T_H - T_P(\vec{x}, \vec{y})}{|T_H| + |T_P(\vec{x}, \vec{y})|} \right| + \left| \frac{|R_H| - |R_P(\vec{x}, \vec{y})|}{|R_H| + |R_P(\vec{x}, \vec{y})|} \right| \right] df,$$

где T_H и R_H – измеренные КП и КО;
 T_P и R_P – рассчитанные КП и КО;
 f_H и f_K – начальная и конечная частоты диапазона;
 \vec{x} – вектор подбираемых параметров слоев образца;
 \vec{y} – вектор известных параметров слоев образца.

Представленная методика измерений позволяет эффективно оценивать радиотехнические качества различных конструкционных материалов и корректировать технологию их производства.

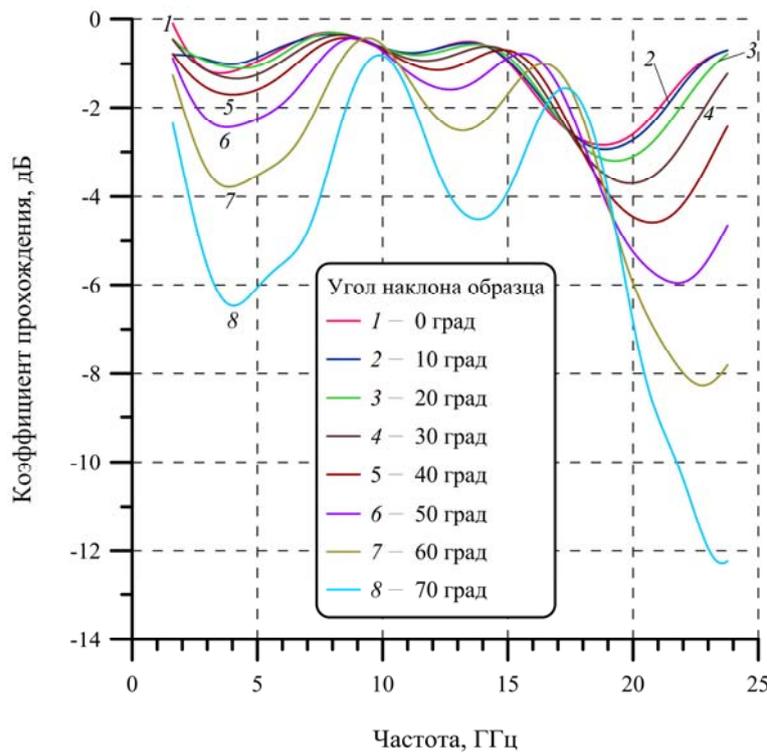


Рис. 1. Измеренные частотные зависимости коэффициента пропускания пятислойного конструкционного образца в диапазоне от 2 до 24 ГГц при различных углах падения электромагнитной волны

ЛИТЕРАТУРА

[1] Семенов В.Н., Чистяев В.А., Политико А.А., Басков К.М. Стенд для измерения в свободном пространстве радиофизических параметров материалов в сверхширокой полосе сверхвысоких частот. // Изм. техника, №2, 2019.

ОПТИМИЗАЦИЯ УГЛА ПРИ ЗАОСТРЁННЫХ ВЕРШИНАХ ШЕСТИУГОЛЬНОЙ ПЛАСТИНЫ, ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ ДИАГРАММ РАССЕЯНИЯ

И.И. Краснолобов, А.М. Лебедев, И.А. Селин, В.Н. Семененко,
Т.А. Фурманова
ИТПЭ РАН

При измерениях (либо расчёте) диаграмм обратного рассеяния (ДОР) элементов конструкции в условиях нахождения элементов на металлической поверхности, исследуемый элемент помещают по центру шестиугольной металлической пластины-лодки с двумя заострёнными носами, используемой в качестве основы макета. Диаграмма элемента измеряется в плоскости, которой принадлежат нормаль к пластине и оба заострённых носа. Поскольку поле обратного рассеяния от основы макета как таковой накладывается на измеряемое поле элемента конструкции, то решение задачи минимизации собственной моностатической ЭПР (далее для краткости просто ЭПР) шестиугольной металлической пластины является актуальным.

В приближении физической оптики, при наклонном облучении заострённые пластины имеют меньшую ЭПР, чем пластины с ровными краями [1]. Физико-оптические расчёты ДОР шестиугольной пластины показывают, что чем длиннее носы пластины, тем быстрее и значительнее падает ЭПР пластины при отходе направления визирования от нормали. Действительно, в пределе при стремлении длины носа к бесконечности ДОР пластины стремится к дельта-функции с ненулевым значением по нормали к пластине.

Расчёты в строгой постановке подтверждают указанную тенденцию уменьшения ЭПР шестиугольной пластины в широкой окрестности нормали к пластине при удлинении носов. Однако с приближением направления визирования к скользящему усиливаются проявления дифракционных эффектов, выражающиеся в увеличении ЭПР, особенно выраженном для волны с перпендикулярной поляризацией (вектор E падающей волны имеет составляющую, перпендикулярную поверхности пластины). В диаграмме появляется приповерхностный максимум, характерный для рёберных волн, бегущих вдоль краёв пластины. Например, для шестиугольной пластины шириной 30 см на частоте 3 ГГц высота приповерхностного максимума приблизительно 0.01 м^2 для углов 80° при заострённых носках, 0.1 м^2 для углов 40° и 1 м^2 для углов 10° . Поэтому до сих пор углы заострённых носов выбирались равными 60° – 80° из компромиссных соображений. Отметим, что поверхностные токи давали бы аналогичные приповерхностные максимумы

ЭПР, но именно в случае шестиугольной пластины отсутствуют края значительной длины, перпендикулярные направлению облучения, которые могли бы генерировать такой ток при облучении волной перпендикулярной поляризации.

Обычные меры по борьбе с рёберными волнами, а именно нанесение радиопоглощающего покрытия вдоль рёбер, позволяют подавить дифракционные эффекты. При этом угловой интервал применимости приближения физической оптики увеличивается с 20° – 30° до 70° – 80° от нормали к пластине.

Для волны параллельной поляризации при направлениях визирования, приближающихся к скользящему, ЭПР шестиугольной пластины с РПП вдоль рёбер приближается к тем же уровням ЭПР, что и на перпендикулярной поляризации.

Таким образом, вытягивание носов шестиугольной пластины является желательным, поскольку ведёт к понижению собственной ЭПР пластины и в окрестности нормали, и в близких к скользящему направлениях. Окончательный выбор угла при вершине пластины определяется размером рабочей зоны стенда для проведения измерений.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Knott E.F., Shaeffer J.F., Tuley M.T. Radar cross Section // Scitech Publishing Inc., 2004.

ИЗМЕНЕНИЕ ОТРАЖЕНИЯ И ПРОХОЖДЕНИЯ ЧЕРЕЗ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПЛАСТИНУ НА РЕЗОНАНСЕ СОБСТВЕННОЙ ВОЛНЫ ПЛАСТИНЫ

А.М. Лебедев¹, М.Л. Обухов²

¹ИТПЭ РАН

²МФТИ

В работе численно исследовалось отражение и прохождение электромагнитной волны (ЭМВ) через плоскую диэлектрическую пластину с малыми потерями, при введении дифракционной решётки на поверхности диэлектрика. Решётка используется для преобразования энергии падающей электромагнитной волны в энергию собственной волны диэлектрической пластины. Полагалось, что дифракционная решётка состоит из брусков малого поперечного сечения из того же диэлектрика, а сама пластина может как лежать на металлической подложке, так и граничить со свободным пространством и сверху, и снизу. Рассматривалось падение ЭМВ как по нормали к пластине, так и под углом к нормали, но в плоскости, перпендикулярной брускам.

В разных конфигурациях (пластина на подложке – без подложки) для собственной волны диэлектрического слоя с потерями из численного решения дисперсионного уравнения находилась комплексная постоянная распространения, после чего определялась длина волны. Период дифракционной решётки выбирался равным длине собственной волны диэлектрического волновода. Тогда, хотя основной максимум решётки приходится на направление обычного преломления ЭМВ в диэлектрик, но волна, соответствующая первому дифракционному максимуму, проходит в диэлектрик под тем же углом, под которым в объёме диэлектрика движутся волновые фронты, формирующие собственную волну. Наконец, удержание ЭМВ в диэлектрической пластине (а не уход энергии собственной волны из диэлектрика в результате переизлучения во внешнюю область на той же дифракционной решётке) обеспечивался путём образования резонатора на основе диэлектрической пластины в результате введения невыступающих металлических стенок по боковым сторонам пластины. При этом длина пластины должна быть равна длине собственной волны, умноженной на число брусков дифракционной решётки. Тогда на резонансе накопление энергии в диэлектрической пластине становится энергетически выгодным, а поглощение энергии падающей ЭМВ обеспечивается даже при малом уровне потерь в результате формирования в диэлектрике стоячей волны большой амплитуды.

Отметим, что поскольку конечная ширина пластины и введение

дифракционной решётки на её поверхности меняет постоянную распространения собственной волны, то окончательный подбор расстояния между брусками решётки и, соответственно, длины пластины выполнялся в ходе решения серии дифракционных задач по максимуму проявлений резонансных эффектов.

Хотя мощность резонанса собственной волны пластины ограничивается потерями энергии на излучение с краёв пластины, однако для диэлектрика умеренной плотности (с относительной диэлектрической проницаемостью до 25) наблюдался резонанс собственной волны слоя, проявлявшийся как узкополосное уменьшение ЭПР слоя в направлениях отражения луча от пластины и прохождения луча через пластину от нескольких раз до трёх-четырёх порядков. Изменение добротности резонанса собственной волны пластины выполнялось изменением нескольких параметров, например, изменением уровня потерь, толщины диэлектрика и типа волны (числа стоячих волн по толщине пластины).

**РАЗРАБОТКА И ТЕСТИРОВАНИЕ ГИБРИДНОГО МЕТОДА
РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ РАССЕЯНИЯ ПРОТЯЖЁННЫМ,
СЛОЖНЫМ ПО СОСТАВУ ОБЪЕКТОМ**

А.М. Лебедев, И.А. Селин, Т.А. Фурманова

ИТПЭ РАН

Рассчитать рассеяние волны сантиметрового диапазона от протяжённого, с размерами от нескольких метров до нескольких десятков метров (соответственно, от ста до тысячи и более длин волн), и при этом сложного по составу объекта одним численным методом невозможно. Действительно, рассчитать рассеяние размерным объектом в целом можно только приближённым квазиоптическим методом, отбрасывая мелкие центры рассеяния (ЦР) в виде элементов конструкции на поверхности объекта и сглаживая поверхность. Однако таким методом нельзя адекватно рассчитать рассеяние на отдельных ЦР, если сам ЦР, либо его составные части имеют размеры порядка и менее длины волны. Наоборот, здесь требуется расчёт в строгой постановке (без приближений). Таким образом, гибридизация методов расчёта обратного и двухпозиционного рассеяния электромагнитной волны протяжённым, сложным по составу объектом является неизбежной.

Отметим, что вклад отдельных ЦР в рассеяние от всего объекта начинает играть решающую роль в тех угловых областях, где вклад формы объекта в рассеяние мал. Например, это может быть справедливо для направлений визирования, близких к скользящим вдоль больших нижней и верхней поверхностей, когда рассеяние от объекта начинает определяться вкладами отдельных ЦР, расположенных на этих поверхностях.

Разрабатывается вариант гибридного численного метода решения задач, когда рассеяние сглаженным объектом рассчитывается методом физической оптики, с уточнением вклада острых кромок по физической теории дифракции [1,2], а далее добавляются вклады отдельных ЦР на поверхности объекта, вычисленные методом поверхностных интегральных уравнений. Диаграмма рассеяния ЦР вычисляется в составе макета, включающего также вырезку из прилежащей поверхности объекта. Вырезка имеет малозаметную форму в виде шестиугольной пластины-лодки. Наличие вырезки позволяет учесть переотражения падающего и рассеянного ЦР полей в окружающей поверхности, вообще изменение токов на ЦР по сравнению с его нахождением в свободном пространстве. Развиваемый подход представляет собой численную версию физической теории дифракции.

Решён ряд методических вопросов: 1) подавление дифракционных эффектов на краях вырезки, 2) устранение двойного учёта вкладов в

рассеянное поле от токов на поверхности вырезки, 3) учёт переотражений в поверхности, окружающей ЦР. Показано, что наиболее заметные дифракционные эффекты имеют место вследствие возбуждения рёберных волн вдоль границ макета и их последующей вторичной дифракции. Дифракционные эффекты способны заметно исказить поле рассеяния ЦР в близких к скользящему направлениях, однако нанесение радиопоглощающего покрытия вдоль краёв вырезки подавляет их. Двойной учёт вкладов в рассеянное поле от токов на поверхности вырезки устраняется вычитанием собственного поля рассеяния вырезки из поля рассеяния ЦР на вырезке. Наконец, учёт переотражений падающего и рассеянного ЦР полей в окружающей поверхности обеспечивается выбором вырезки достаточно больших размеров, с включением всех участков поверхности объекта, где переотражения возможны.

Работоспособность метода при определении как обратного, так и бистатического рассеяния объектами, имеющими в своём составе ЦР, для которых диаграмма рассеяния рассчитывается отдельно, показана на многих примерах.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Буторин Д.И., Мартынов Д.А., Уфимцев П.Я.* Асимптотические выражения для элементарной краевой волны // Радиотехника и электроника, 1987. С. 1818-1829.
- [2] *Уфимцев П.Я.* Основы физической теории дифракции. – М.: Бином, 2009, 352 с.

ШИРОКОПОЛОСНЫЙ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЙ МЕТАМАТЕРИАЛ НА МАГНИТНОЙ ПОДЛОЖКЕ

А.Н. Лагарьков, В.Н. Семенов, В.Н. Кисель, В.А. Чистяев,
И.И. Краснолобов, А.А. Политико, С.А. Федоров, Н.Л. Меньших
ИТПЭ РАН

Одно из перспективных направлений в развитии антенной техники связано с достижениями в области создания так называемых метаматериалов (ММ), искусственных композиционных материалов с необычными физическими свойствами [1]. Особенность данных материалов обусловлена резонансным взаимодействием электромагнитной волны, распространяющейся в среде, наполненной элементами определенной формы и размера, обеспечивающими резонансное возбуждение токов в этих элементах. Одно из первых упоминаний в литературе об использовании метаматериалов в качестве радиопоглотителей содержится в [2]. Резонансные элементы могут быть выполнены в виде добротных диэлектрических резонаторов или бифилярных (лево- и правозакрученных) проволочных спиралей [3-5]. Практическому использованию ММ в качестве радиопоглощающих материалов (РПМ) посвящена работа [6].

Данная работа посвящена модификации РПМ на основе проволочного метаматериала LR-5A, представляющего собой двумерную периодическую решетку из равной смеси лево- и правозакрученных спиралей из нихромового провода (3 витка провода с шагом 2 мм, диаметр витка 5 мм), расположенную на тонком магнетодиэлектрическом слое толщиной 0,5 – 1,0 мм (рис. 1).



Рис. 1. Внешний вид образца ММ LR-5A

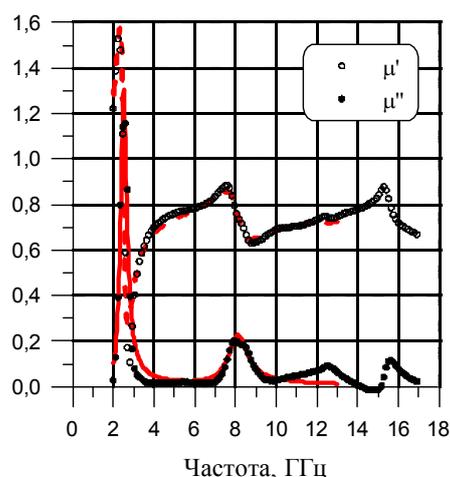


Рис. 2. Частотная дисперсия комплексной магнитной проницаемости ММ LR-5A

Как показано в настоящей работе, существование первых трех основных магнитных мод в проволочных спиралях (основная мода на частоте 2,7 ГГц, вторая (утроенная основная) и третья (упятеренная основная) моды) (рис. 2) обеспечивает дополнительное согласование магнито-диэлектрического слоя со свободным пространством, что приводит к значительному снижению коэффициента отражения (КО) РПМ на металлической подложке в широкой полосе частот. Частотные зависимости КО РПМ при нормальном падении электромагнитной волны (рис. 3) и угловые зависимости КО РПМ от бистатического угла зондирования в полосе частот от 2 до 13 ГГц (рис. 4) при вертикальной поляризации электромагнитной волны показывают высокую эффективность предложенного типа РПМ для снижения КО металлических пластин.

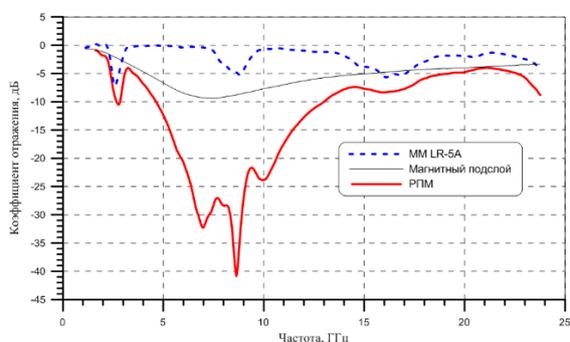


Рис. 3. Частотные зависимости КО MM LR-5A, магнитного подслоя толщиной 1 мм и РПМ при нормальном падении электромагнитной волны

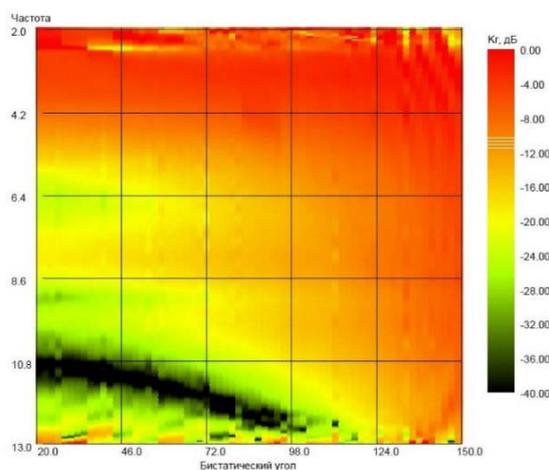


Рис. 4. Зависимость КО РПМ от бистатического угла зондирования для вертикальной поляризации волны

Эффективность применения РПМ для снижения обратного рассеяния прямоугольной металлической пластины продемонстрирована диаграммами обратного рассеяния (ДОР) прямоугольной металлической пластины с РПМ в дальней зоне в безэховой камере при однопозиционном зондировании в полосе частот от 2 до 24 ГГц при вертикальной поляризации волны. На рис. 5 представлены азимутальные диаграммы однопозиционной эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) металлической пластины размерами 230×230 мм в исходном виде и пластины с РПМ для вертикальной поляризации электромагнитной волны на частоте 2,5 ГГц, соответствующей частоте основной магнитной моды MM LR-5A и на рис. 6 – для частоты 7,8 ГГц, соответствующей второй магнитной моде с учетом влияния магнитной подложки. Представленные ДОР пластины с РПМ демонстрируют высокую

эффективность работы РПМ на основе ММ LR-5A в широкой полосе частот, как в области основной, так и высшей магнитной моды.

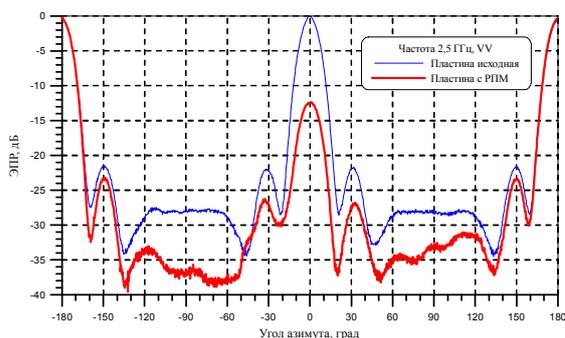


Рис. 5. ДОР пластины в исходном виде и пластины с РПМ на частоте 2,5 ГГц при вертикальной поляризации волны

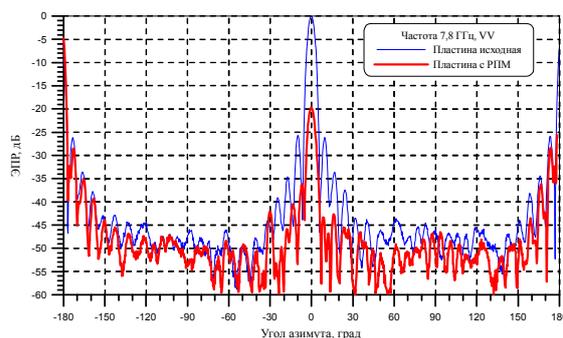


Рис. 6. ДОР пластины в исходном виде и пластины с РПМ на частоте 7,8 ГГц при вертикальной поляризации волны

Широкополосность поглощения РПМ на основе ММ наряду с широкоугольностью поглощения другой структуры РПМ на основе ММ, расположенного на металлической подложке, и тонкого полупрозрачного магнитного слоя со слоем развязки сверху в области частот (около 2,8 ГГц) с отрицательными значениями проницаемостей ($\epsilon \approx \mu \approx -1$) [7] указывают на уникально достижимые характеристики радиопоглощения РПМ на основе ММ в области искусственных магнитных мод.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] V.G. Veselago, Soviet Physics Uspekhi, vol. 10, no 4, 1968. PP. 509 – 514.
- [2] S.A. Kuehl et al., Conf. Proc. of the CHIRAL'95 International Conference, – The Pennsylvania State University, 1995.
- [3] М.В. Костин и др., Радиотехника и электроника, № 11, 1992.
- [4] A.N. Lagarko, et al., Electromagnetics, vol. 17, no 3, 1997. P. 213.
- [5] V.N. Semenenko et al., Proceedings of the "Bianisotropics'97" International Conference and Workshop on Electromagnetics of Complex Media, – Glasgow, 1997/ PP. 285 – 288.
- [6] А.Н. Лагарьков и др., Радиотехника и электроника, Т.57, №10, 2012. С.1119 – 1127.
- [7] A.N. Lagarkov et al., Progress in Electromagnetic Research Letters, v.1, 2008. PP. 35 – 44.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

СОДЕРЖАНИЕ

1. **ВИБРАЦИОННЫЕ НЕСТАБИЛЬНОСТИ МОЛЕКУЛ В SERS И РАМАНОВСКОЕ ЛАЗИРОВАНИЕ: ОБЩИЕ СВОЙСТВА И РАЗЛИЧИЯ.** В.Ю. Шишков, Е.С. Андрианов, А.А. Пухов, А.П. Виноградов, ИТПЭ РАН, МФТИ, ФГУП «ВНИИА» им.Н.Л. Духова 3
2. **ВРЕМЯ ОТКЛИКА ПЛАЗМОННОГО ЛАЗЕРА С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ В ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ АМПЛИТУДНОЙ МОДУЛЯЦИИ.** Н.Е. Нефедкин, А.А. Зябловский, Е.С. Андрианов, А.А. Пухов, А.П. Виноградов, ИТПЭ РАН, МФТИ, ФГУП «ВНИИА» им.Н.Л. Духова 4
3. **ОПТИЧЕСКИЙ НАНОВОЛНОВОД ТИПА “ВИТАЯ ПАРА”.** Е.Д. Чубчев, И.А. Нечепуренко, А.В. Дорофеев, А.П. Виноградов, ФГУП «ВНИИА» им.Н.Л. Духова, ИТПЭ РАН 5
4. **ПЕРЕХОД ОТ НЕКОГЕРЕНТНОГО УСИЛЕННОГО СПОНТАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ К КОГЕРЕНТНОМУ ВЫНУЖДЕННОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ В БЕЗРЕЗОНАТОРНОМ ЛАЗЕРЕ.** И.В. Доронин, А. А. Зябловский, Е.С. Андрианов, А.А. Пухов, А.П. Виноградов, Ю.Е. Лозовик, А.А. Лисянский, ФГУП «ВНИИА» им.Н.Л. Духова, МФТИ, ИТПЭ РАН, ИСАН, The Graduate Center of the City University of New York 6
5. **ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ РЕЖИМОВ ГЕНЕРАЦИИ ЭРБИЕВОГО ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ.** А.М. Смирнов, А.П. Базакуца, Ю.К. Чаморовский, И.А. Нечепуренко, А.В. Дорофеев, О.В. Бутов, ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, ФГУП «ВНИИА» им.Н.Л. Духова, ИТПЭ РАН 7
6. **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УЛЬТРАЗВУКА ПРИ ОСАЖДЕНИИ МИОГЛОБИНА ИЗ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ НА ГКР-АКТИВНЫЕ ПОДЛОЖКИ С РАЗЛИЧНОЙ МОРФОЛОГИЕЙ.** И.А. Рыжиков, А.Д. Аверьянова, М.В. Седова, И.А. Богинская, К.Н. Афанасьев, И.Н. Курочкин, ИТПЭ РАН, МФТИ, ИБХФ РАН 8
7. **РАЗРАБОТКА ПОДЛОЖЕК НА ОСНОВЕ КОМПОЗИТА ПОЛИ-ХЛОРОП-КСИЛИЛЕНА-АГ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ЭФФЕКТА ГИГАНСКОГО КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ.** И.А. Богинская, А.Ю. Вдовиченко, А.В. Гусев, А.А. Гайнутдинова, К.А. Маилян, А.Е. Михайлицин, И.А. Рыжиков, М.В. Седова, ИТПЭ РАН, НИЦ «Курчатовский институт», МФТИ 10
8. **МЕТОД ХАРАКТЕРИЗАЦИИ МОРФОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ГКР-АКТИВНЫХ ПОДЛОЖЕК.** Б.Д. Тонанайский, И.А. Богинская, И.А. Рыжиков, М.В. Седова, И.В. Быков, Н.Д. Ушаков, А.Д. Аверьянова, МФТИ, ИТПЭ РАН . 12

9. МНОГОЧАСТИЧНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ПОДКРУЧЕНОМ ГРАФЕНЕ ПРИ МАГИЧЕСКОМ УГЛЕ ПОДКРУТКИ. <u>А.О. Сбойчаков</u>, А.В. Рожков, А.Л. Рахманов, Ф. Нории, ИТПЭ РАН, Center for Emergent Matter Science, RIKEN, Wako-shi, Saitama, Japan	15
10. РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УЛЬТРАЗВУКА И ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРА НА ПРОБОПОДГОТОВКУ ДЛЯ КР ИССЛЕДОВАНИЯ РАСТВОРА БЕЛКА. <u>Н.Д. Ушаков</u>, И.А. Рыжиков, М.В. Седова, И.А. Богинская, А.С. Ильин, Б.Д. Тонанайский, А.Д. Аверьянова, ИТПЭ РАН, МФТИ	16
11. МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЕ В АНИЗОТРОПНЫХ ВЕЙЛЕВСКИХ ПОЛУМЕТАЛЛАХ. <u>Я.И. Родионов</u>, К.И. Кугель, Ф. Нории, ИТПЭ РАН. Center for Emergent Matter Science, RIKEN, Wako-shi, Saitama, Japan	18
12. ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ НЕОДНОРОДНЫХ СОСТОЯНИЙ В СИСТЕМАХ С ВОЛНАМИ СПИНОВОЙ ПЛОТНОСТИ. А.Л. Рахманов, <u>К.И. Кугель</u>, А.О. Сбойчаков, ИТПЭ РАН	20
13. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ НЕРАВНОВЕСНОЙ ДИНАМИКИ ВОЛНЫ ЗАРЯДОВОЙ ПЛОТНОСТИ. П.Е. Долгирев, <u>А.В. Рожков</u>, Б. Файн, Harvard University, USA, Сколковский институт науки и технологий (Сколтех), ИТПЭ РАН	21
14. РЕАЛИЗАЦИЯ КВАНТОВЫХ АЛГОРИТМОВ НА ЗАШУМЛЕННЫХ КВАНТОВЫХ КОМПЬЮТЕРАХ НА ОСНОВЕ СВЕРХПРОВОДНИКОВ. <u>В.В. Погосов</u>, А.А. Жуков, Е.О. Киктенко, Д.И. Бабухин, А.А. Елистратов, С.В. Ремизов, Ю.Е. Лозовик, ФГУП «ВНИИА» им.Н.Л. Духова, ИТПЭ РАН, РКЦ, МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет, ИСАН	22
15. ПОВЕРХНОСТНАЯ И ОБЪЕМНАЯ СПИНОВАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ТОПОЛОГИЧЕСКОГО ИЗОЛЯТОРА. Р.Ш. Акзянов, <u>А.Л. Рахманов</u>, ИТПЭ РАН, МФТИ	24
16. СПИНОВЫЕ ВОЛНЫ В ДВОЙНОЙ ЦЕПОЧКЕ МАГНИТНЫХ ЧАСТИЦ. <u>А.М. Пикалов</u>, А.В. Дорофеенко, А.Б. Грановский, МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет, ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, ИТПЭ РАН	25
17. ИЗМЕРЕНИЕ МАТЕРИАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СПЕЧЕННЫХ ФЕРРИТОВ $Zn_{1-x}Ni_xFe_2O_4$ В ДИАПАЗОНЕ 0.04-10 ГГц. <u>Д.П. Лелюк</u>, К.Н. Розанов, Д.А. Петров, П.А. Зезюлина, С.Н. Старостенко, А.Ю. Стариков, В.Е. Живулин, Д.А. Винник, ИТПЭ РАН, Южно-Уральский государственный университет	26

18. ВАРИАЦИИ УСЛОВИЙ СИНТЕЗА ОБОЛОЧКИ SiO ₂ НА ПОВЕРХНОСТИ ЧАСТИЦ МАГНИТНЫХ ПОРОШКОВ. <u>А.В. Долматов</u> , С.С. Маклаков, П.А. Зезюлина, Д.А. Петров, А.В. Осипов, А.С. Набоко, С.А. Маклаков, А.Н. Лагарьков, ИТПЭ РАН, МФТИ	28
19. СВЧ ИССЛЕДОВАНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК СУПЕРМАЛЛОЯ ВО ВНЕШНЕМ ПОСТОЯННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ. <u>А.О. Ширяев</u> , С.Ю. Бобровский, П.А. Зезюлина, А.С. Набоко, Д.А. Петров, К.Н. Розанов, ИТПЭ РАН	31
20. РАЗРАБОТКА ПЕРЕКЛЮЧАЕМЫХ СВЧ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ ТОНКИХ ПЛЁНОК VO ₂ . <u>В.И. Полозов</u> , С.С. Маклаков, С.А.Маклаков, Л.А. Алексеева, А.С. Набоко, Д.А. Петров, А.Д. Мишин, К.М. Басков, В.Н. Кисель, ИТПЭ РАН, МФТИ	32
21. ПРОБЛЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ СВЧ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ В КОРОТКОЗАМКНУТОЙ МИКРОПОЛОСКОВОЙ ЯЧЕЙКЕ. <u>С.Ю. Бобровский</u> , Д.А. Петров, К.Н. Розанов, С.Н. Старостенко, ИТПЭ РАН	34
22. ПРИМЕНЕНИЕ КОРОТКОЗАМКНУТЫХ СТАНДАРТОВ ДЛЯ КАЛИБРОВКИ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ВОЛНОВОДА. <u>Д.А. Петров</u> , К.Н. Розанов, ИТПЭ РАН	35
23. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПИЛОНА С ОБЪЕКТОМ ИЗМЕРЕНИЯ НА ТОЧНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ. Н.П. Балабуха, <u>Н.Л. Меньших</u> , ИТПЭ РАН	36
24. МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ ДВУХПОЗИЦИОННОЙ ЭПР ПО ПОЛЮ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ. Н.П. Балабуха, <u>Д.А. Коняев</u> , Н.Е. Шапкина, ИТПЭ РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет, каф. Математики .	38
25. ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЯ ШИРОКОПОЛОСНОЙ РУПОРНОЙ АНТЕННЫ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ. <u>С.А. Федоров</u> , Н.Л. Меньших, В.С. Солосин, А.А. Политико, В.Н. Семененко, В.А. Чистяев, Е.В. Булычев, ИТПЭ РАН	42
26. ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЙ ДИАГРАММ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ. Н.П. Балабуха, <u>Е.В. Булычев</u> , А.С. Зубов, Н.Л. Меньших, А.В. Никитенко, ИТПЭ РАН	45
27. ШИРОКОПОЛОСНЫЕ ВОЛНОВОДНЫЕ СОГЛАСОВАННЫЕ НАГРУЗКИ НА ОСНОВЕ ФЕРРОЭПОКСИДА. В.Н. Семененко, К.М. Басков, <u>Д.И. Акимов</u> , А.А. Политико, В.А. Чистяев, А.Ю. Зарубина, ИТПЭ РАН ..	48
28. ИЗМЕРЕНИЕ УГЛОВЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПРОПУСКАНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ. К.М. Басков, <u>А.А. Политико</u> , В.Н. Семененко, В.А. Чистяев, И.И. Краснолобов, Д.И. Акимов, ИТПЭ РАН	50

29. ОПТИМИЗАЦИЯ УГЛА ПРИ ЗАОСТРЁННЫХ ВЕРШИНАХ ШЕСТИУГОЛЬНОЙ ПЛАСТИНЫ, ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ ДИАГРАММ РАССЕЯНИЯ. И.И. Краснолобов, <u>А.М.Лебедев</u> , И.А. Селин, В.Н. Семенов, Т.А. Фурманова, ИТПЭ РАН	52
30. ИЗМЕНЕНИЕ ОТРАЖЕНИЯ И ПРОХОЖДЕНИЯ ЧЕРЕЗ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПЛАСТИНУ НА РЕЗОНАНСЕ СОБСТВЕННОЙ ВОЛНЫ ПЛАСТИНЫ. <u>А.М. Лебедев</u> , М.Л. Обухов, ИТПЭ РАН, МФТИ	54
31. РАЗРАБОТКА И ТЕСТИРОВАНИЕ ГИБРИДНОГО МЕТОДА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ РАССЕЯНИЯ ПРОТЯЖЁННЫМ, СЛОЖНЫМ ПО СОСТАВУ ОБЪЕКТОМ. <u>А.М. Лебедев</u> , И.А. Селин, Т.А. Фурманова, ИТПЭ РАН	56
32. ШИРОКОПОЛОСНЫЙ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЙ МЕТАМАТЕРИАЛ НА МАГНИТНОЙ ПОДЛОЖКЕ. А.Н. Лагарьков, <u>В.Н. Семенов</u> , В.Н. Кисель, В.А. Чистяев, И.И. Краснолобов, А.А. Политико, С.А. Федоров, Н.Л. Меньших, ИТПЭ РАН	58

**ДВАДЦАТАЯ ЕЖЕГОДНАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ИТПЭ РАН**

Сборник тезисов докладов

Подписано в печать 04.19		Формат 60x84/16
Печать офсетная	Уч.-изд.л. 2,25	Усл.-печ.л 2,09
Тираж 100 экз.	Заказ № 79	

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