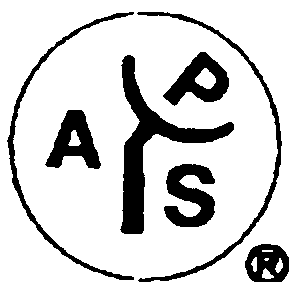
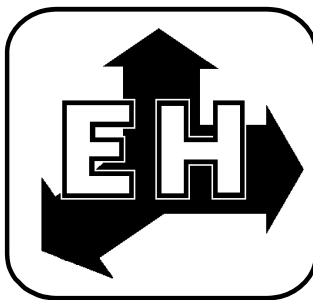


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ПРИКЛАДНОЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИТПЭ РАН)

IEEE-APS-LEOS-CHAPTER



ВОСЕМНАДЦАТАЯ ЕЖЕГОДНАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
ИТПЭ РАН

(Москва – 15 - 19 мая 2017 г.)

Сборник тезисов докладов

## **ВОСЕМНАДЦАТАЯ ЕЖЕГОДНАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ИТПЭ РАН ПРИ ПОДДЕРЖКЕ IEEE-APS-LEOS-CHAPTER**

Сборник тезисов докладов.

Под редакцией д.ф.-м.н. В.Н. Киселя – М.: ИТПЭ РАН. 2017. 82 с.

Сборник содержит тезисы докладов, представленных на Восемнадцатой ежегодной научной конференции ИТПЭ РАН.

Конференция посвящена обзору научных разработок и практических приложений, осуществленных в Институте теоретической и прикладной электродинамики РАН 2016 году. Представлен также ряд работ других организаций, имеющих сходную тематику.

Цель конференции - обмен информацией, призванный дать импульс развития фундаментальным исследованиям в направлении, определяемом запросами практики, и ускорить внедрение результатов фундаментальных исследований.

Организационный комитет  
академик РАН А.Н. Лагарьков  
д.ф.-м.н. В.Н. Кисель  
к.ф.-м.н. К.Н. Розанов  
д.ф.-м.н. И.Т. Якубов  
к.ф.-м.н. А.Т. Кунавин  
М.Е. Жукова

## ОДНОФОТОННАЯ АПКОНВЕРСИЯ

В.Ю. Шишков<sup>1,2,3</sup>, Е.С. Андрианов<sup>1,2</sup>, А.А. Пухов<sup>1,2,3</sup>, А.П. Виноградов<sup>1,2,3</sup>,  
А.А. Лисянский<sup>4,5</sup>

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

<sup>2</sup>МФТИ (ГУ)

<sup>3</sup>ИТПЭ РАН

<sup>4</sup>Department of Physics, Queens College of the City University of New York

<sup>5</sup>The Graduate Center of the City University of New York

В работе исследуется возможность атомом, поглотившим один фотон, возбудить другой атом, частота перехода которого существенно больше. Предполагается, что расстояние между атомами столь мало, что возбуждение передаётся за счёт диполь-дипольного взаимодействия. Показано, что взаимодействие атомов с резервуарами, разрушающими когерентность системы, приводит к возбуждению высокоэнергетического атома. Во многих красителях и биологических молекулах время сбоя фазы  $\tau_{DC}$  гораздо меньше времён жизни возбуждённых уровней  $\tau_{Life}$ . В этом случае передача возбуждения происходит за время  $\tau_{Excitation}$ , пропорциональное  $\tau_{DC}$ . Испускание вторым возбуждённым атомом фотона является ап-конверсией изначального фотона в высокоэнергетический. Квантовый выход процесса равен  $1 / (1 + \tau_{Life2} / \tau_{Life1} + \tau_{Excitation} / \tau_{Life1})$  и при  $\tau_{Life1} \gg \tau_{Life2}, \tau_{Excitation}$  должен превышать одну вторую. Что отличает данный процесс от многоквантовой ап-конверсии, где квантовый выход всегда меньше одной второй. В процессе перехода системы в конечное состояние происходит высасывание энергии из резервуара [1, 2], сопровождающееся увеличением энтропии системы.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Edward J. O'Reilly & Alexandra Olaya-Castro Nat. Com., vol. 5, 2014. P.3012.  
[2] S. Oviedo-Casado et. al. Phys. Rev. A., vol. 93, 2016. P.020102(R).

# ЭФФЕКТИВНОЕ ПОДАВЛЕНИЕ ШУМОВ В КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНЕЙ СИЛЫ

Н.Е. Нефедкин<sup>1,2</sup>, Е.С. Андрианов<sup>1,2</sup>, А.А. Пухов<sup>1,2</sup>, А.П. Виноградов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ИТПЭ РАН

<sup>2</sup>МФТИ (ГУ)

Когерентная динамика открытых систем различной физической природы в последнее время привлекает всё большее внимание. Прежде всего, стоит упомянуть открытые квантовые системы, кубиты, химические и биологические системы [1]. Одним из основных свойств открытых систем является высокий уровень потерь и шумов, которые существенно влияют на динамику системы.

При взаимодействии с резервуаром наряду с изменением энергии системы всегда присутствует случайное воздействие на систему. Имеет место флуктуационно-диссипационная теорема (ФДТ) [2], которая связывает отклик линейной системы на внешнее воздействие со спектральными характеристиками этой системы. Стоит отметить, что даже в линейном случае динамика фазы в присутствии шума достаточно нетривиальна. В последнее время влияние шума на динамику фазы интенсивно изучалась в задачах об эффекте Джозефсона [3].

В данной работе исследуются фазовые флуктуации диссипативного осциллятора, взаимодействующего с внешней силой. Установлено, что существуют значения амплитуды и частоты внешнего поля, которые разделяют два режима динамики системы. Характерной величиной, которая разделяет данные режимы, является автокорреляционная функция косинуса фазы. В первом режиме она затухает на больших временах к некоторому отличному от нуля стационарному значению. Во втором режиме имеют место незатухающие осцилляции автокоррелятора косинуса фазы. На основе уравнения Адлера для фазы показано, что переход от первого режима ко второму происходит тогда, когда эффективный потенциал для фазы становится немонотонной функцией.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] *R.S. Ingarden et al.*, Information dynamics and open systems: classical and quantum approach (Springer Science & Business Media, 2013).
- [2] *U.M.B. Marconi et al.*, "Fluctuation–dissipation: response theory in statistical physics," Physics reports vol. 461, 2008. P.111-195.
- [3] *W.T. Coffey et al.*, Phys. Rev. B, vol. 62, 2000. P.3480.

**ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ СИЛЬНО ЛОКАЛИЗОВАННАЯ БЛОХОВСКАЯ  
ПЛАЗМОННАЯ МОДА НА ПЕРИОДИЧЕСКИ ПРОФИЛИРОВАННОЙ  
ПОВЕРХНОСТИ ПРИ СУБВОЛНОВЫХ МАСШТАБАХ  
НЕОДНОРОДНОСТЕЙ**

**Е.Д. Чубчев<sup>1</sup>, И.А. Нечепуренко<sup>1,2</sup>, А.П. Виноградов<sup>1,2</sup>**

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

<sup>2</sup>ИТПЭ РАН

Показано, что существует особый вид поверхностных плазмонных мод, которые существуют только на шероховатых поверхностях. Эти моды существуют в частотном диапазоне, в котором сумма действительных частей диэлектрических проницаемостей металла и прилегающего диэлектрика является положительной. В случае гладкой металлической поверхности в этом частотном диапазоне поверхностные плазмон-поляритоны не могут существовать. Причиной существования этих мод являются плазмонные резонансы дефектов поверхности (англ. surface-shape resonance) [1]. При достаточно небольшом расстоянии между дефектами взаимодействие между ними приводит к образованию наночастичного волновода [2, 3] и, следовательно, к образованию распространяющихся плазмонных мод.

**ЛИТЕРАТУРА**

- [1] P. C. Das and J. I. Gersten, *Phys. Rev. B* 25, 6281 (1982)
- [2] M. Quinten, A. Leitner, J. R. Krenn, and F. R. Aussenegg, *Optics Letters*, Vol. 23, № 17, p. 1331 (1998)
- [3] D.G. Baranov, A.P. Vinogradov, A.A. Lisyansky, *JOSA B*, Vol.32, №2, p. 281 (2015)

**ДИНАМИЧЕСКАЯ МАГНИТНАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ ГЕТЕРОГЕННЫХ  
НАНОСИСТЕМ НА ОСНОВЕ КОМПОЗИТОВ  $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$**

**А.Б. Грановский<sup>1,2</sup>, Ю.Е. Калинин<sup>3</sup>, М.А. Каширин<sup>3</sup>, В.В. Рыльков<sup>2,4</sup>,  
К.Н. Розанов<sup>2</sup>, А.В. Ситников<sup>3</sup>, Е. Ганьшина<sup>1</sup>, С.А. Вызулин<sup>5</sup>,  
А.Н. Талденков<sup>4</sup>**

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

<sup>2</sup>ИТПЭ РАН

<sup>3</sup>ВГУ

<sup>4</sup>НИЦ «Курчатовский институт»

<sup>5</sup>Краснодарское высшее военное училище им. генерала армии С.М. Штеменко

Методом ионно-лучевого напыления получены тонкие пленки нанокomпозитов  $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$  и гибридных мультислоев “нанокomпозит – полупроводник”  $[(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}/\text{C}]_{50}$  при различном содержании  $x$  наноразмерных гранул ферромагнитного металла  $\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20}$  в матрице  $\text{SiO}_2$  и различной толщине углеродной прослойки  $h < 2$  нм. Исследованы их магнитные и электрические свойства, высокочастотная магнитная проницаемость, магнитооптические спектры и спектры ФМР. Установлено, что при  $x < x_{\text{пер}}$ , где  $x_{\text{пер}}$  – порог перколяции по электрической проводимости, как однослойные нанокomпозиты, так и мультислои с прослойками являются суперпарамагнитными: отсутствует гистерезис при комнатной температуре, а температура блокировки, определенная по квазистатическим измерениям, не превышает 20-30 К и слабо зависит от толщины прослойки углерода. В то же время при толщинах прослойки  $h = 1.2-1.8$  нм действительная и мнимая части комплексной магнитной проницаемости при 50 МГц и при комнатной температуре достигают существенно более высоких значений по сравнению с нанокomпозитами без прослоек углерода, по величине более характерных для ферромагнетиков. Показано, что кажущееся ферромагнитным поведение динамической магнитной проницаемости не связано с образованием дальнего магнитного порядка, а является следствием обменного взаимодействия между суперпарамагнитными гранулами соседних слоев через прослойку углерода, проявляющееся при высоких частотах. Обсуждается влияние проводящей прослойки на статические и динамические магнитные свойства системы взаимодействующих суперпарамагнитных частиц.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты №16-19-10233 и №16-19-10490) и МОиН (проектная часть государственного задания).

**ИНВЕРСНЫЙ МАГНИТОКАЛОРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ И  
МАГНИТОСТРУКТУРНЫЙ МАРТЕНСИТНЫЙ ПЕРЕХОД В СПЛАВАХ  
ГЕЙСЛЕРА НА ОСНОВЕ Ni-Mn-In**

**А.Б. Грановский<sup>1,3</sup>, И.Д. Родионов<sup>1</sup>, М.И. Блинов<sup>1</sup>, Ю.С. Кошкидько<sup>2</sup>,  
В.Н. Прудников<sup>1</sup>, М.Н. Прудникова<sup>1</sup>, Е.А. Ганьшина<sup>1</sup>**

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

<sup>2</sup>МЛСМПиНТ, Вроцлав, Польша

<sup>3</sup>ИТПЭ РАН

Сплавы Гейслера Ni-Mn-In вблизи стехиометрического состава Ni<sub>50</sub>Mn<sub>35</sub>In<sub>15</sub> характеризуются сочетанием необычных свойств, связанных с магнитоструктурным мартенситным переходом (МП) первого рода [1]. Одним из таких свойств является гигантский инверсный магнитокалорический эффект (МКЭ) [1,2]. В последние годы достигнут значительный прогресс в понимании МКЭ [1-3], однако многие вопросы относительно свойств инверсного МКЭ, имеющие принципиальное значение для практического применения в магнитных рефрижераторах, а именно, динамическое поведение, полевая зависимость, температурный гистерезис, воспроизводимость при термоциклировании, размерный эффект, влияние предыстории, остаются нерешенными [1]. Дискуссионным является и вопрос о природе магнитоструктурного мартенситного перехода [1]. В докладе приводятся результаты исследования магнитных, магнитокалорических, магнитотранспортных и магнитооптических свойств четверных сплавов Гейслера Ni-Mn-In-Z, где Z легирующий элемент, в слабых (до 2 Тл) и сильных (до 14 Тл) полях. В качестве легирующих элементов использовались Co, Si, Ag, Al, Cr, В и Bi. Легирование кардинально изменяет основные параметры инверсного МКЭ. Обнаружено значительное влияние скорости нагрева образца до приложения поля на величину адиабатического изменения температуры при мартенситном переходе.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 15-02-01976 и 15-02-02077).

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] *I. Dubenko et al.*, in Novel Functional Magnetic Materials, Springer Series in Material Sciences, 2016, PP.41-82.
- [2] *J. Liu et al.*, Nature Materials, vol. 11, 2012. P. 620
- [3] *T. Gottschall et al.*, Phys. Rev. Applied, vol. 5, 2016. P.024013.

# ДЕТЕКЦИЯ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ ВИРУСОВ МЕТОДОМ ПОВЕРХНОСТНО-УСИЛЕННОГО КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЙНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕРЕБРЯНЫХ ПОДЛОЖЕК

**Н.Н. Дурманов<sup>1</sup>, И.А. Богинская<sup>2</sup>, Р.Р. Гулиев<sup>1</sup>, И.Н. Курочкин<sup>1</sup>,  
А.Н. Лагарьков, И.А. Рыжиков<sup>2</sup>, И.А. Родионов<sup>3</sup>, А.С. Бабурин<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>ИБХФ РАН

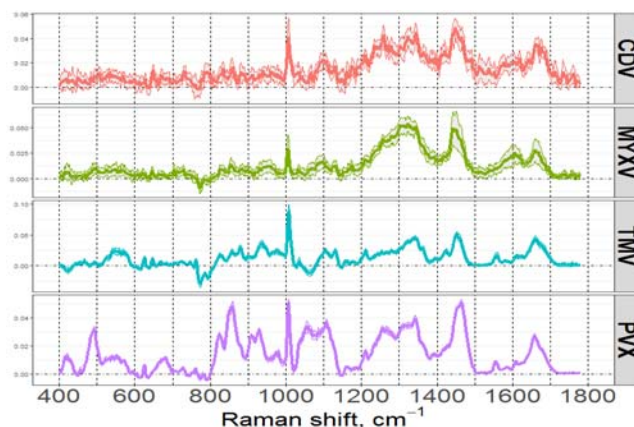
<sup>2</sup>ИТПЭ РАН

<sup>3</sup>НОЦ «Функциональные микро/наносистемы»

Исследована возможность использования серебряных подложек, полученных методом электронно-лучевого распыления в вакууме, представляющих собой наноструктурированные пленки, для получения усиленных спектров комбинационного рассеяния [1] инактивированных вирусов животных и растений. Продемонстрировано наличие эффекта поверхностно-усиленного комбинационного рассеяния, получены спектры четырех вирусов: двух растительных патогенов - вируса табачной мозаики (TMV), X-вируса картофеля (XPV); и двух аттенуированных (инфекционно неактивных) штаммов животных вирусов – вируса миксоматоза кроликов (MYXV) и вируса чумы плотоядных (CDV). На рисунке 1 представлены их спектры.

Полученные спектры были проанализированы: было проведено соотнесение пиков к соответствующим химическим группам и соединениям, после чего при помощи метода главных компонент и линейного дискриминантного анализа (PCA-LDA) [2] было осуществлено разделение между группами и сформирована статистическая модель для классификации объектов по спектрам. Надежность модели была подтверждена посредством live-one-out (LOO) кросс-валидации [3], и повторной *k*-кратной кросс-валидации [4]. Анализ нагрузок на главные компоненты позволил выделить части спектров, наиболее значимые для разделения спектров разных вирусов. Сравнение данных двух подходов подтвердило, что различия в спектрах вирусов, позволяющие их идентифицировать, коррелируют с различиями в составе и строении вирусных частиц.





**Рис. 1.** Обработанные спектры вирусов (среднее  $\pm$  стандартное отклонение), с вычтенным спектром контроля.

Таким образом, была продемонстрирована возможность применения новых серебряных подложек в качестве биосенсоров для обнаружения и опознания патогенных вирусов. Была разработана математическая модель и было осуществлено математическое разделение спектров вирусов, что позволяет с большой точностью выделять спектры значимых вирусов из общей массы спектров.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Marek Prochazka*, Surface-Enhanced Raman Spectroscopy. Springer Int. Pub. Prague 2015
- [2] *Jon Shlens*, A tutorial on principal component analysis: Derivation, Discussion and Singular Value Decomposition. 25 March 2003; Version 1
- [3] *Aly A. Farag, Shireen Y. Elhabian*, A Tutorial on Data Reduction Linear Discriminant Analysis (LDA). CVIP Lab University of Louisville, 2008
- [4] <http://www.machinelearning.ru/wiki/index.php?title=Кросс-валидация>.

**ПРОФИЛИРОВАННЫЕ СЕРЕБРЯННЫЕ ПОДЛОЖКИ  
ДЛЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ МЕТОДОМ  
КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ**

**И.А. Богинская<sup>1</sup>, К.Н. Афанасьев<sup>1</sup>, А.С. Бабурин<sup>2</sup>, И.Н. Курочкин<sup>3</sup>,  
И.А. Рыжиков<sup>1</sup>, И.А. Родионов<sup>2</sup>, М.В. Седова<sup>1</sup>, А.Н. Лагарьков<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>ИТПЭ РАН

<sup>2</sup>НОЦ «Функциональные микро/наносистемы»

<sup>3</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Химический факультет

Разработка чувствительных элементов для детектирования малых количеств биологических объектов, таких как белки, бактерии, вирусы, и других сложных биологических объектов, а также их распознавание является одной из актуальных задач исследований. Для реализации данных задач разрабатываются методы на основе эффекта поверхностно-усиленного комбинационного рассеяния на профилированных серебряных тонких пленках. В ряде работ было показано теоретическое обоснование применимости металлических пленок с различными параметрами шероховатости как перспективных для усиления [1,2] сигнала комбинационного рассеяния

Нам удалось реализовать создание тонких серебряных пленок на подложках из слюды и кремния <111> методом электронно-лучевого испарения в вакууме с возможностью управления морфологией таких пленок. Толщина пленок составила 100 нм. Пленки были охарактеризованы с помощью растровой электронной микроскопии, атомно-силовой микроскопии, эллипсометрии. Среднеквадратичная шероховатость таких пленок не превышает 2 нм, при этом они характеризуются наличием выделенных дефектов структуры с амплитудой больше 10 нм, что делает их перспективными объектами для усиления электромагнитного поля [1].

Нами были проведены эксперименты с рядом биологических объектов, инактивированные бактерии *E.coly*, белки, миоглобин, гликированный и негликированный альбумин и БСЖК с концентрацией 10 – 0,01 мкг/мл. В качестве контроля использовали напыленный аналогичным способом слой алюминия и кварц.

Проведенные эксперименты показали эффективность использования данных подложек для регистрации сигнала комбинационного рассеяния биологических объектов в низких концентрациях с возможностью усиления сигнала на три порядка.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] S.S. *Jha*, J.R. *Kirtley*, and J.C. *Tsang* Intensity of Raman scattering from molecules adsorbed on a metallic grating // Phys. Rev. B, 22, 1980. P3973-3982.
- [2] K. *Arya* and R. *Zeyher* Optical response from a randomly rough surface: Theory and numerical results // Phys. Rev. B, 28, 1983. P4090-4105.

## ЛОКАЛИЗАЦИЯ СВЕТА В КОМПОЗИТНЫХ МЕТАЛЛО-ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МИКРОРЕЗОНАТОРАХ

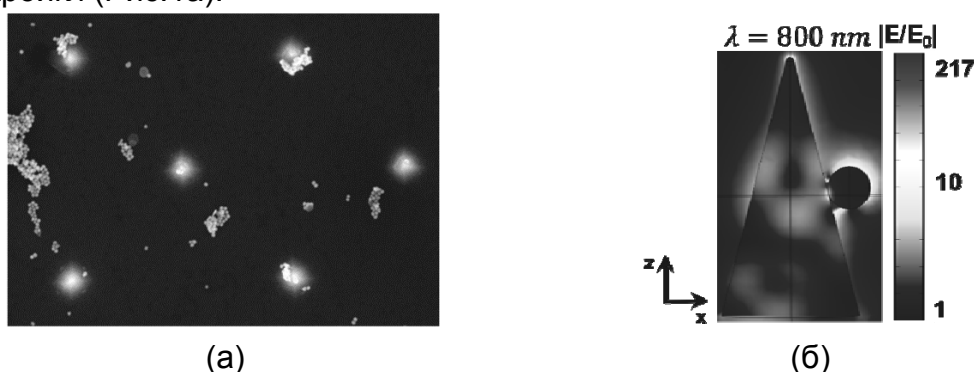
А.В. Иванов<sup>1</sup>, И.В. Быков<sup>1</sup>, И.А. Богинская<sup>1</sup>, И.А. Будашов<sup>2</sup>,  
И.Н. Курочкин<sup>2,3</sup>, А.Н. Лагарьков<sup>1</sup>, И.А. Рыжиков<sup>1</sup>, М.В. Седова<sup>1</sup>,  
А.К. Сарычев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИТПЭ РАН

<sup>2</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Химический факультет

<sup>3</sup>ИБХФ РАН

Проведено комплексное исследование оптических свойств мета-поверхности, состоящей из периодически расположенных кремниевых микроигл (Рис.1а).



**Рис.1.** (а) СЭМ. Периодическая система микроигл с адсорбированными наночастицами золота, покрытыми ДТНБ. Параметры: период 2.12 мкм, высота игл 0.3-0.7 мкм, угол при вершине  $30^\circ$ , радиус кривизны вершины не более 10 нм. (б) Распределение поля  $|E/E_0|$  на длине волны 800 нм в диэлектрическом резонаторе, на поверхность которого помещена металлическая наночастица.

В силу того, что расстояние между иглами много больше длины волны оптического излучения, структура представляет собой дифракционную решетку, в которой каждая игла – независимый диэлектрический резонатор. Если такой резонатор аппроксимировать конусом с идеально гладкой поверхностью, то при взаимодействии со светом в таком резонаторе возбуждаются разные виды электромагнитных мод – дипольные моды, а также моды типа шепчущей галереи. При нанесении на поверхность такого диэлектрического резонатора металлических наночастиц, резонансы смещаются и носят гибридный характер (Рис.1б). Такие резонансы приводят к дополнительному усилению локального электромагнитного поля вблизи поверхности на несколько порядков. Численные расчеты подтверждены экспериментальными результатами.

На поверхность, состоящую из конусных микрорезонаторов были адсорбированы наночастицы золота (НЧЗ) со средним диаметром 56 нм,

обработанные 5,5-дитио-бис(2-нитробензойной кислотой) (ДТНБ), которая имеет известный спектр комбинационного рассеяния (КР) света. Проведены эксперименты по измерению сигнала КР в различных областях мета-поверхности, в которых образовались кластеры НЧЗ с ТНБ. Результаты экспериментов показали, что нормированный на количество НЧЗ сигнал КР от НЧЗ-ТНБ на частоте стоксова сдвига  $1338 \text{ см}^{-1}$  (соответствует колебаниям связи  $\text{NO}_2$  в ТНБ) усилен до  $10^3$  раз в том месте, где кластеры металла расположились непосредственно на боковой грани кремниевых игл. Это доказывает теоретическое предположение о гибридном – металло-диэлектрическом характере резонансов в исследованной мета-поверхности.

## ЛИТЕРАТУРА

[1] A.Lagarkov, I. Boginskaya, I. Bykov, I. Budashov, A. Ivanov, I. Kurochkin, I. Ryzhikov, I. Rodionov, M. Sedova, A. Zverev, and A.K. Sarychev, Localization of light on silicon tip-shaped meta surface, Optics Express (2017) – подана в печать.

## УСИЛЕНИЕ СИГНАЛА ГИГАНТСКОГО КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЙЯНИЯ НА ПОДЛОЖКАХ НА ОСНОВЕ ОДНОМЕРНЫХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

**Р.А. Сиразов<sup>3</sup>, К.Н. Афанасьев<sup>1</sup>, И.А. Богинская<sup>1</sup>, И.А. Будашов<sup>2</sup>,  
И.Н. Курочкин<sup>2</sup>, А.Н. Лагарьков<sup>1</sup>, А.В. Дорофеев<sup>1</sup>, А.П. Виноградов<sup>1</sup>,  
И.А. Рыжиков<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>ИТПЭ РАН

<sup>2</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Химический факультет

<sup>3</sup>МФТИ (ГУ)

Ранее мы показали реализацию численного эксперимента [1] последовательного усиления интенсивности поля на границе слоёв фотонного кристалла из чередующихся пар слоёв диоксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ) и оксида циркония ( $\text{ZrO}_2$ ) [2]. Эксперименты показали возможность дополнительного усиления гигантского комбинационного рассеяния до 50 раз на границе с внешней средой. Такие структуры могут быть перспективны в качестве электродинамически активных подложек для усиления сигнала комбинационного рассеяния. Мы предполагаем улучшить результаты эксперимента с помощью модификации внешнего слоя  $\text{SiO}_2$ .

В работе исследовали пленки:  $\text{SiO}_2$  280 нм /  $\{\text{ZrO}_2$  115 нм -  $\text{SiO}_2$  205 нм $\}_xN$ , где  $N = 2, 3, 4$ . Пленки были получены методом электронно-лучевого испарения в вакууме на стеклянных подложках. В качестве образцов сравнения использовали стеклянные подложки с нанесенным с помощью электронно-лучевого испарения слоя  $\text{SiO}_2$  толщиной больше 200 нм.

Теоретический расчёт коэффициента усиления электрического поля на поверхности кристалла предполагает увеличение интенсивности сигнала органической метки в 260-370 раз. С помощью эллипсометрических исследований проверили соответствие сформированных покрытий теоретическим расчётам.

При измерении спектров комбинационного рассеяния возбуждали структуры через призму в геометрии (призма  $\text{SiO}_2$ )/фотонный кристалл из воздуха с помощью лазера с длиной волны 785 нм. Для сравнения усиливающих свойств подложек использовали специальную метку, которая представляла собой тионитробензойную кислоту (ТНБ), адсорбированную на наночастицах золота размером 56 нм. Наночастицы наносили на поверхность подложек с помощью самоадсорбции из водного раствора.

Сравнения эффективности подложек проводили, измеряя интенсивность полосы колебания нитро группы  $\text{NO}_2$  при  $1346 \text{ см}^{-1}$  молекулы ТНБ, предварительно нанесённой на поверхность кристалла. Возбуждающее излучение с длиной волны 785 нм подводили под одинаковыми углами из воздуха и через призму на исследуемую структуру и контрольный образец и

сравнивали их интенсивности.

В результате проведённого исследования получили усиление интенсивности комбинационного рассеяния на фотонном кристалле в 170 раз по сравнению с электродинамически не активной подложкой SiO<sub>2</sub> при возбуждении из воздуха, что даёт пятикратное улучшение усиления сигнала по сравнению с подложками без модифицированного слоя SiO<sub>2</sub>.

При измерении плёнок - SiO<sub>2</sub> 280 нм / {ZrO<sub>2</sub> 115 нм - SiO<sub>2</sub> 205 нм}xN, получили характерное распределение интенсивностей от угла падения лазерного луча, предсказанное теоретически [1]. Так же в результате проведённых эллипсометрических измерений нашли, что слой золотых наночастиц на поверхности фотонного кристалла сильно изменяет аппаратную функцию системы, а именно ослабляет наблюдаемый эффект усиления, но все же превышает аналогичные показатели для геометрии Кречманна [1].

Проведённое исследование показало, что модифицирование толщины внешнего слоя SiO<sub>2</sub> может увеличить коэффициент усиления сигнала метки комбинационного рассеяния.

## ЛИТЕРАТУРА

[1] *И.А. Нечепуренко, А.В. Дорофеев, А.П. Виноградов, И.Н. Курочкин*, Усиление комбинационного рассеяния поверхностной волной в фотонном кристалле / Вестн. Моск. Ун-Та. Сер. 2. Химия. 2015. Т. 56. №3.

[2] *К.Н. Афанасьев, И.А. Богинская, И.В. Быков, И.А. Будашов, И.Н. Курочкин, А.В. Дорофеев, И.А. Рыжиков, Р.А. Сиразов*. Усиление сигнала гигантского комбинационного рассеяния на подложках на основе фотонных кристаллов. Сборник трудов 17-й ежегодной научной конференции ИТПЭ РАН. 2016. С. 6-7.

**МЕМРИСТИВНЫЕ СВОЙСТВА СТРУКТУР  
НА ОСНОВЕ НАНОКОМПОЗИТА  $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{V}_{20})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$   
В.В. Рыльков<sup>1,2</sup>, А.В. Емельянов<sup>2</sup>, В.А. Демин<sup>2</sup>, С.Н. Николаев<sup>2</sup>,  
К.Э. Никируй<sup>2,3</sup>, В.А. Леванов<sup>2,4</sup>, А.В. Ситников<sup>5</sup>, Ю.Е. Калинин<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>ИТПЭ РАН

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

<sup>3</sup>МФТИ (ГУ), ФНБИК

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

<sup>5</sup>ВГТУ

Исследованы вольт-амперные характеристики структур металл/нанокомпозит/металл на основе нанокомпозита (НК)  $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{V}_{20})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$  толщиной 3-4 мкм в полях до  $\sim 10^4$  В/см. Структуры синтезированы методом ионно-лучевого распыления составной мишени, позволяющей в едином цикле формировать НК различного состава в диапазоне  $x = 5 - 48$  ат.%. При  $x \approx 10$  ат. % обнаружен мемристовый эффект (МЭ), проявляющийся в резистивном переключении структуры и хранении возникающих состояний. МЭ слабо зависел от используемых металлических контактов (Cu или Cr) и толщины слоя НК. Число циклов переключения (без деградации) превышало  $N_{max} \sim 10^5$  раз, а отношение электрических сопротивлений в высокоомном и низкоомном состояниях достигало  $R_{off}/R_{on} \approx 65$ . Продемонстрирована возможность подбора произвольного резистивного состояния структур в диапазоне между  $R_{on}$  и  $R_{off}$ .

Обнаруженный МЭ объясняется существенным влиянием кислородных вакансий на туннельную проводимость цепочек из гранул металла, определяющих электрическое сопротивление структур ниже порога перколяции. Полученные значения  $N_{max}$  сравнимы с теми, что достигнуты в случае мемристоров на основе  $\text{HfO}_2$ , в которых отношение  $R_{off}/R_{on} \sim 6$ , т.е. на порядок меньше [1].

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-19-10233.

## ЛИТЕРАТУРА

[1] *D. Ielmini et al.*, Semicond. Sci. Technol. vol. 31, 2016. P. 063002.



# ОСОБЕННОСТИ НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЙЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ НА НЕОДНОРОДНОСТЯХ СЛОИСТОЙ СИСТЕМЫ

Р.С. Пузько<sup>1</sup>, Д.Н. Козлов<sup>2</sup>, В.И. Фабелинский<sup>2</sup>, А.К. Сарычев<sup>3</sup>,  
К.Н. Афанасьев<sup>3</sup>, И.А. Рыжиков<sup>3</sup>, И.А. Богинская<sup>3</sup>, М.В. Седова<sup>3</sup>,  
А.М. Мерзликин<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>МФТИ (ГУ)

<sup>2</sup>ИОФ РАН

<sup>3</sup>ИТПЭ РАН

При рассеянии электромагнитной волны на случайных неоднородностях в слоистой структуре возникает некогерентная часть излучения [1]. Эта часть с одной стороны негативно отражается на добротности слоистых резонаторов (в частности, снижая чувствительность слоистых сенсоров), а с другой стороны несет в себе информацию о самой слоистой системе. Поэтому изучение некогерентной части рассеянного излучения представляет интерес для определения микроструктуры композиционной среды и создания неразрушающих систем контроля наноструктурированных объектов.

В данной работе исследовано некогерентное рассеяние электромагнитной волны на случайных включениях в слоистой системе. В качестве включений рассмотрены частицы, имеющие малый размер по сравнению с длиной волны. В длинноволновом приближении можно рассматривать отклик частиц как излучение диполей, с дипольным моментом, зависящим от формы и размеров. Рассмотрено рассеяние как в объеме слоистой системы, так и на шероховатости границ слоев.

Показано, что в диаграмме рассеяния имеются максимумы, соответствующие собственным модам системы. Ширина соответствующих лепестков определяется добротностью мод. Также рассмотрено некогерентное рассеяние на поверхностных неоднородностях (шероховатостях) фотонного кристалла и в системе Кретчманна. Эти системы поддерживают высокодобротные моды, что проявляется и в спектре некогерентного рассеяния.

Проведено сравнение с экспериментальными данными рассеяния на оксиде церия, сформированном на алюминиевой пленке. Показано, что наблюдаемая картина усиления рассеяния хорошо согласуется с теоретической моделью.

## ЛИТЕРАТУРА

[1] *P. Sheng*, Introduction to wave scattering, localization and mesoscopic phenomena, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УЛЬТРАЗВУКА ПРИ ОСАЖДЕНИИ  
МИОГЛОБИНА ИЗ ВОДНОГО РАСТВОРА НА ГКР-АКТИВНЫЕ ПОДЛОЖКИ**  
**Н.Д. Ушаков<sup>3</sup>, И.А. Рыжиков<sup>1</sup>, А.В. Зверев<sup>2</sup>, И.А. Родионов<sup>2</sup>, М.В. Седова<sup>1</sup>,  
В.И. Полозов<sup>3</sup>, И.А. Богинская<sup>1</sup>, И.Н. Курочкин<sup>4</sup>, А.Н. Лагарьков<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>ИТПЭ РАН

<sup>2</sup>НОЦ «Функциональные микро/наносистемы»

<sup>3</sup>МФТИ (ГУ)

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

Пробоподготовка сложных биологических объектов, таких как белки, бактерии, вирусы для регистрации их методом поверхностно-усиленного комбинационного рассеяния на подложках, представляющих собой тонкие металлические пленки, является важной задачей, определяющей достоверность получаемых результатов. На сегодняшний день существует проблема регистрации проб белков низких концентраций (менее 1 мг/л) на подложках ограниченной площади, требующих высушивания раствора. Пробоподготовка с помощью высушивания должна обеспечивать химическую стабильность пробы и не превышать время, заложенное на анализ. Выполнение этих условий необходимо для внедрения технологии в массовое использование. Пробоподготовка с помощью ультразвуковой (УЗ) сушки является перспективным и актуальным методом для образцов растворов белков, поскольку позволяет уменьшить скорость высушивания и не вызывает разложение белка.

Для осуществления поставленной задачи нами был создан стенд для ультразвуковой обработки пробы. Стенд включает в себя генератор, подложкодержатель, пьезоэлементы с различными резонансными частотами и оптический микроскоп. Был проведен ряд экспериментов по пробоподготовке раствора белка миоглобина в воде с концентрацией 1 мкг/мл на подложках, представляющих собой тонкие пленки серебра толщиной не более 100 нм с профилированной наноструктурой. Мы воздействовали ультразвуком на каплю раствора белка объемом 3 мкл, нанесенную на подложку с помощью микродозатора переменного объема ThermoScientific. В результате воздействия удалось уменьшить время сушки до 30% и уменьшить площадь высушенного осадка. Анализ осажденного белка осуществляли с помощью конфокального микроскопа WITec. Спектры комбинационного рассеяния высушенного белка соответствовали спектрам контроля, что говорит об отсутствии изменения конформаций белка при пробоподготовке. Обнаружено влияние УЗ на характер кристаллизации и конформации белков.

Проведенные эксперименты показали, что созданный нами ультразвуковой стенд в перспективе позволит осуществлять пробоподготовку растворов белка с сокращением времени высушивания без повреждения пробы.

# МАГНИТООПТИЧЕСКИЙ БИОСЕНСОР НА ОСНОВЕ СЛОИСТОГО ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА

А.М. Мерзликин<sup>1,2</sup>, Е.В. Кузнецов<sup>1,2</sup>, А.Б. Грановский<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>ИТПЭ РАН

<sup>2</sup>МФТИ (ГУ)

<sup>3</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет

Одно из направлений современной биосенсорики связано с высокоточным измерением диэлектрической проницаемости в тонких пленках. Предполагается, что поверхность сенсора специальным образом подготавливается (например, наносятся специальные тела, связывающиеся только с исследуемыми белками), затем наносят исследуемый раствор и по осаждению на поверхность исследуемых веществ определяют их концентрацию. Само осаждение (и, как следствие, наличие в растворе исследуемого вещества) обычно определяют оптическим способом. Во время осаждения в приповерхностном слое изменяется диэлектрическая проницаемость и, если поверхность сенсора является оптическим резонатором, то его частота немного сдвигается, и именно этот сдвиг и можно достаточно легко измерить. На этом принципе работают широко известные плазмонные сенсоры компании БиаКор [1], а также сенсоры, использующие поверхностную волну в слоистом фотонном кристалле [2, 3].

Нами было исследовано изменение эффекта Керра (поворот плоскости поляризации отраженного сигнала) в фотонном кристалле (ФК), поддерживающем одновременно s- и p-поляризованную поверхностную волну, при изменении диэлектрической проницаемости окружения ФК. Показано, что эффект Керра значительно увеличивается вблизи пересечения дисперсионных кривых для s- и p-поляризованных поверхностных волн. При изменении показателя преломления приповерхностного слоя на 0,001 происходит изменение эффекта Керра примерно на 1°.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] <https://www.biacore.com/lifesciences/index.html>
- [2] *Konopsky, V.N.; Alieva, E.V.* A biosensor based on photonic crystal surface waves with an independent registration of the liquid refractive index. *Biosens. Bioelectron.* 2010, 25, 1212–1216.
- [3] *Baryshev, A. V.; Merzlikin, A. M.; Inoue, M.* “Efficiency of optical sensing by a plasmonic photonic-crystal slab”, *Journal of Physics D-Applied Physics* 46, 12 (2013).

## САМОУСРЕДНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ В СЛОИСТОЙ СИСТЕМЕ

Р.С. Пузько<sup>1</sup>, А.М. Мерзликин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>МФТИ (ГУ)

<sup>2</sup>ИТПЭ РАН

Задача о распространении электромагнитных волн через неоднородную слоистую среду традиционно привлекает внимание исследователей [1]. Однако, решение этой проблемы для композитных материалах с большим количеством включений приводит к громоздким вычислениям. Сложность расчета рассеяния электромагнитных волн на подобных структурах привела к идее описания таких структур как однородных, но обладающих некоторыми эффективными параметрами. Задача поиска таких эффективных параметров называется задачей гомогенизации.

Введение эффективных параметров для статики и динамики существенно отличается. В динамике, в отличие от статики, амплитуда электрического поля связана с магнитным. Ранее было показано [2], что, что вне статического приближения нельзя корректно ввести эффективные диэлектрическую и магнитную проницаемости, однако, в длинноволновом приближении можно ввести эффективный показатель преломления  $n_{eff}$ , который самоусредняется с увеличением системы [2].

Данная работа посвящена изучению свойств  $n_{eff}$ . Показано, что  $n_{eff}$  самоусредняется при различных соотношениях параметров (длины волны, размеров системы и неоднородностей). При этом явление Андерсоновской локализации света в случайной слоистой системе может быть описано как самоусреднение мнимой части  $n_{eff}$ . Исследованы аналитические свойства эффективного волнового вектора. Показано наличие соотношений вида Крамерса-Кронига, из которых в частности следует соотношение Хуберда-Джоноса-Таулесса [3,4]. Исследовано явление рандомизации фазы в слоистой системе.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] А.П. Виноградов, Электродинамика композитных материалов, М.: Эдиториал УРСС, 2001.
- [2] A.P. Vinogradov and A.M. Merzlikin, JETP, vol. 94(3), 2002. P.482.
- [3] D.J. Thouless, Journal of Physics C, vol. 5(1), 1972. P.77.
- [4] D.C. Herbert and R. Jones, Journal of Physics C, vol. 4(10), 1971. P.1145.

## КОНИЧЕСКАЯ РЕФРАКЦИЯ В МАГНИТООПТИЧЕСКОМ ДВУХОСНОМ КРИСТАЛЛЕ

Е.В. Кузнецов<sup>1</sup>, А.М. Мерзликин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ИТПЭ РАН

<sup>2</sup>МФТИ (ГУ)

Рассмотрено влияние магнитного поля на распространение света в магнитооптическом двухосном кристалле. Изочастота двухосного кристалла (поверхность постоянной частоты в пространстве волновых векторов) имеет особую точку – точку самопересечения, в которой волновые вектора для двух ортогональных поляризации совпадают, то есть в этом направлении распространение вырождено по поляризации [1]. При распространении света в направлении этой точки происходит коническая рефракция – луч света расходится в виде конуса. Магнитное поле, как правило, снимает вырождение, поэтому мы ожидаем исчезновения точки самопересечения и, следовательно, исчезновения конической рефракции при включении поля. Таким образом, возможно управление распространением света внешним магнитным полем.

Получено аналитическое разложение изочастоты двухосного магнитооптического кристалла вблизи точки самопересечения. Показано, что при включении магнитного поля изочастота в точке самопересечения расщепляется и перезапускается.

Расчеты распространения света в двухосном кристалле велись с помощью разложения падающего луча по плоским волнам. Продемонстрировано, что при включении внешнего магнитного поля вместо конической рефракции наблюдается распространение света в одном направлении.

Показано, что при определенном значении недиагональных элементов тензора диэлектрической проницаемости кристалла изочастота в окрестности точки самопересечения представляет собой две плоскости. Это означает, что возможен режим каналирования в двухосном кристалле – луч света распространяется без дифракционного уширения. Данный эффект продемонстрирован численно.

### ЛИТЕРАТУРА

[1]. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц, Курс теоретической физики. Т.8. Электродинамика сплошных сред. 4-е изд., Москва, 2005.

**ПОДАВЛЕНИЕ ПЕРЕКРЕСТНОЙ СВЯЗИ В ПЛАЗМОННЫХ ВОЛНОВОДАХ**  
**Е.В. Кузнецов<sup>1</sup>, А.М. Мерзликин<sup>1,2</sup>, А.А. Зябловский<sup>1,2</sup>, А.П. Виноградов<sup>1,2</sup>,**  
**А.А. Лисянский<sup>3,4</sup>**

<sup>1</sup>ИТПЭ РАН

<sup>2</sup>МФТИ (ГУ)

<sup>3</sup>Queens College of the CUNY

<sup>4</sup>The Graduate Center of the CUNY

Плазмонные волноводы являются ключевыми элементами оптических устройств, используемых в наноплазмонике [1, 2]. Преимущество плазмонных волноводов заключается в их малых размерах, достижимых благодаря субволновой локализации электромагнитного поля, а также высоких рабочих частотах, вплоть до оптических. Основными недостатками являются омические потери и перекрестная связь между волноводами. Перекрестная связь возникает в результате перекрытия собственных мод волноводов. Когда два волновода расположены близко друг к другу, энергия перетекает из одного волновода в другой.

Для увеличения пропускной способности оптических линий необходима большая плотность плазмонных волноводов, что неизбежно ведет к увеличению перекрестной связи. Поэтому была изучена возможность подавления связи между плазмонными волноводами при помощи введения дополнительного волновода между ними. Дополнительный волновод изменяет дисперсионное уравнение собственных мод. При правильном выборе параметров волновода удастся добиться, чтобы волновые числа симметричной и антисимметричной мод в несущих волноводах совпали. В этом случае любая линейная комбинация мод проходит через систему без изменений. В частности, волна, возбуждаемая в одном из боковых волноводов, может быть представлена в виде суммы симметричной и антисимметричной мод. Следовательно, для данной волны перекрестная связь между волноводами отсутствует.

Были подобраны параметры волноводов и численно продемонстрировано, что при помещении дополнительного волновода перекрестная связь между двумя несущими волноводами исчезает. Произведено сравнение распространения сигнала в системе без дополнительного волновода и с ним.

## **ЛИТЕРАТУРА**

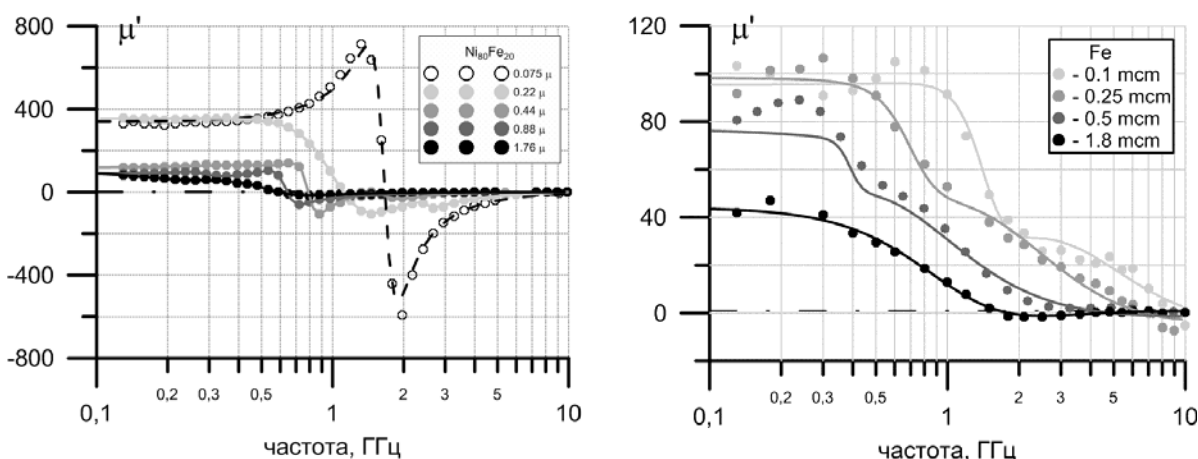
- [1] S. I. Bozhevolnyi et al. Nature, 440, 508-511, 2006.  
[2] J. T. Kim et al., Optics Express, 16, 13133, 2008.

# ИЗМЕНЕНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ПЛЕНОК ФЕРРОМАГНИТНЫХ МЕТАЛЛОВ С РОСТОМ ТОЛЩИНЫ ПЛЕНКИ

**А.В. Осипов, С.Ю. Бобровский, П.А. Зезюлина, А.Н. Лагарьков,  
С.А. Маклаков, С.С. Маклаков, К.Н. Розанов, И.А. Рыжиков, И.Т. Якубов**  
ИТПЭ РАН

Структурированные магнитные материалы на основе тонких ферромагнитных пленок позволяют достичь максимально высоких значений СВЧ магнитной проницаемости, что является принципиальным для множества технических приложений [1]. Магнитные пленки характеризуются высокой чувствительностью магнитных свойств к толщине: с ростом толщины коэффициент Аше, характеризующий предельные СВЧ магнитные свойства материала, падает. Поэтому при разработке таких материалов одним из ключевых моментов является оптимизация толщины.

В докладе представлено исследование зависимости магнитных свойств различных ферромагнитных пленок от их толщины. Наблюдается явная корреляция между статическими и динамическими свойствами пленок. Выделены два типа изменения свойств: скачкообразное (в случае  $Ni_{80}Fe_{20}$ , Co и Fe-N) и плавное (в случае Fe) (см. рис. 1). Анализ экспериментальных данных показал, что падение СВЧ магнитных свойств с ростом толщины обусловлено изменением магнитной структуры (образованием сложной доменной структуры и выходом вектора намагниченности из плоскости пленки). Оптимизация толщины магнитного слоя позволяет заметно поднять эффективность разрабатываемых композитных материалов нового типа.



**Рис. 1.** Частотная зависимость собственной магнитной проницаемости ферромагнитных пленок 2-х типов:  $Ni_{80}Fe_{20}$  (слева) и Fe (справа)

## ЛИТЕРАТУРА

[1] *I.T. Yakubov et al, AIP ADV. Vol.4 (2014), art. no. 107143.*



# ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ЭФФЕКТИВНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ, СОДЕРЖАЩИХ ПОРОШКИ SiC

А.Д. Мишин, К.Н. Розанов, С.Н. Старостенко

ИТПЭ РАН

Большинство полупроводниковых материалов проявляет сильную зависимость радиофизических свойств от температуры, в частности, в СВЧ диапазоне. В связи с этим экспериментальное исследование температурных зависимостей материальных параметров этих материалов представляет значительный интерес как с научной, так и с прикладной точки зрения.

В работе представлены результаты проведенных экспериментальных исследований температурной зависимости СВЧ диэлектрической проницаемости композитных материалов на основе порошков карбида кремния SiC, обладающего высокой температурной стойкостью и широким спектром применения. В отличие от других полупроводников, SiC обладает слабой зависимостью диэлектрических свойств от температуры: его проводимость изменяется в температурном диапазоне от 20°C до 1200°C лишь в несколько раз, в то время как проводимость, например, Ge или Si меняется на несколько порядков.

Для определения эффективных значений СВЧ диэлектрической проницаемости композитных материалов с различным объемным наполнением включений из порошка SiC при комнатной температуре были проведены измерения коэффициентов отражения и пропускания в коаксиальной ячейке в диапазоне 0.1–20.0 ГГц. В качестве матрицы в этих композитных образцах были использованы хорошо прессуемые диэлектрические порошки таких материалов, как каолин и парафин.

Для выявления температурных зависимостей диэлектрических свойств композитных материалов были проведены измерения коэффициента пропускания в свободном пространстве при температурах от 20°C до 1200°C с помощью квазиоптического высокотемпературного стенда, работающего в частотном диапазоне 6–20 ГГц. В этих исследованиях использовались образцы, представляющие собой насыпной слой из порошка карбида кремния, т.е. в качестве матрицы таких композитных образцов выступал воздух между частицами SiC.

В результате работы были определены частотные зависимости СВЧ диэлектрической проницаемости исследуемых композитных образцов при различных температурах до 1200°C. Анализ полученных с использованием теории композитных материалов данных дает возможность делать выводы о собственной диэлектрической проницаемости частиц порошка SiC.

## АГРЕГАЦИЯ ЧАСТИЦ ПРИ СИНТЕЗЕ ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКИ ПОРОШКОВ Fe@SiO<sub>2</sub>

**С.С. Маклаков<sup>1</sup>, С.А. Маклаков<sup>1</sup>, Д.А. Петров<sup>1</sup>, К.Н. Розанов<sup>1</sup>,  
И.А. Рыжиков<sup>1</sup>, А.Ю. Зарубина<sup>1</sup>, В.В. Бессалова<sup>2</sup>, К.А. Талалаев<sup>3</sup>,  
А.Н. Лагарьков<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>ИТПЭ РАН

<sup>2</sup>МГУ имени М.В. Ломоносова, Химический факультет

<sup>3</sup>МФТИ (ГУ)

В продолжение исследований [1], посвящённых возможности создания защитной оболочки для порошков на основе железа, предохраняющей металл от окисления и расширяющей возможности использования этих порошков в качестве наполнителя в композитах, определена стойкость оболочки к внешним воздействиям, изучены возможности вариации условий синтеза оболочки, уточнено содержание в этом порошке SiO<sub>2</sub> и рассмотрен вопрос об агрегации частиц порошка в процессе синтеза.

Обнаружено, что железный порошок в защитной оболочке, Fe@SiO<sub>2</sub>, выдерживает воздействие раствора электролита, вызывающего коррозию, более полугода. За это время с порошком не происходит видимых изменений. При этом Fe@SiO<sub>2</sub> растворяется в концентрированной соляной кислоте примерно за сутки. Порошок Fe без оболочки растворяется за минуты.

Поскольку исследуемый порошок представляет собой неразделимую смесь из частиц Fe@SiO<sub>2</sub> с известной толщиной оболочки и индивидуальных частиц SiO<sub>2</sub>, размер которых имеет распределение, точное определение количества SiO<sub>2</sub> трудноосуществимо. По уточнённым результатам гравиметрии и магнитометрии, данная величина не превышает 5 масс.%. Гравиметрическое определение заключалось в отжиге на воздухе при 1000°C для формирования равновесного оксида железа, взвешивании и сравнении привеса для чистого Fe и Fe@SiO<sub>2</sub>. Отжиг Fe приводит к спеканию в королёк, в то время, как Fe@SiO<sub>2</sub>, при частичном спекании, остаётся порошком.

Синтез защитной оболочки происходит с использованием водного раствора аммиака. Эта же реакция, проведённая в других средах, даёт другие продукты. Кислая среда (pH 3-6, CH<sub>3</sub>COOH, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) приводит к формированию геля, обработка которого позволяет получить частицы миллиметрового размера. Такой продукт быстро окисляется на воздухе за счёт остатков кислоты, сохраняющихся после нейтрализации и отмывки. В нейтральной среде (H<sub>2</sub>O дист.) поверхность железа покрывается оболочкой SiO<sub>2</sub>, которая имеет меньшую толщину, не однородна, и не защищает металл от коррозии в течение длительного времени. Спирто-аммиачная среда при

синтезе Fe@SiO<sub>2</sub> с необходимой стойкостью к окислению является обязательным условием.

Согласно [1], при нанесении защитной оболочки, средний размер частиц порошка Fe увеличивается на 2 мкм. Происходит это за счёт агрегации частиц с образованием «общего» слоя SiO<sub>2</sub>. Выяснить, происходит ли при этом непосредственный контакт между металлическими частицами, при помощи микроскопии и анализа размера частиц, невозможно. Такие контакты между частицами могут приводить к изменению значения диэлектрической проницаемости композитов, в которых порошок служит наполнителем. Для изучения данного вопроса использовали электродинамические измерения. Были изготовлены серии композитов с парафиновой матрицей и различным содержанием наполнителей Fe и Fe@SiO<sub>2</sub>. Для каждого композита измеряли частотные зависимости диэлектрической и магнитной проницаемостей. На их основе строили концентрационные зависимости квазистатических значений диэлектрической и магнитной проницаемостей, которые обрабатывали по формуле Оделевского. Показано, что частицы обоих порошков, Fe и Fe@SiO<sub>2</sub>, характеризуются одинаковым значением фактора размагничивания (~0.23) и собственной магнитной проницаемости. Рассчитанный порог протекания для наполнителя Fe@SiO<sub>2</sub> практически не достижим, для Fe величина  $p_c \approx 0.84$  масс. % наполнителя согласуется с экспериментом. Полученные результаты показывают, что в процессе синтеза диэлектрической оболочки, новых контактов между металлическими частицами не образуется.

При проведении электродинамического исследования объёмную долю наполнителя в получаемых композитах уточняли при помощи магнитометрических измерений.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (16-33- 01089 мол\_а).

## ЛИТЕРАТУРА

[1]. S.S. Maklakov, A.N. Lagarkov, S.A. Maklakov, Y.A. Adamovich, D.A. Petrov, K.N. Rozanov, I.A. Ryzhikov, A.Yu. Zarubina, K.V. Pokholok, D.S. Filimonov. Corrosion-resistive magnetic powder Fe@SiO<sub>2</sub> for microwave applications. // *J. Alloys Compds.* 2017 (706) 267-273.

**ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТНОЙ ЗАВИСИМОСТИ СВЧ МАГНИТНОЙ  
ПРОНИЦАЕМОСТИ ВО ВНЕШНЕМ ПОСТОЯННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ**  
**А.О. Ширяев, С.Ю. Бобровский, А.В. Осипов, Д.А. Петров, К.Н. Розанов,**  
**С.Н. Старостенко**  
ИТПЭ РАН

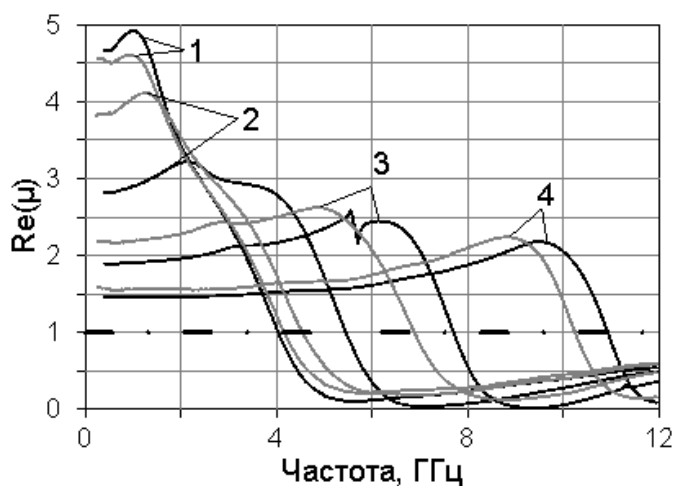
Для исследования СВЧ магнитных свойств материалов часто применяют метод ферромагнитного резонанса (ФМР) – измерение поглощения магнитного образца при изменении внешнего постоянного магнитного поля. Основными проблемами при проведении таких измерений являются плохое согласование СВЧ тракта, что может приводить к снижению точности определения резонансной частоты и ширины резонансной линии, и возможность того, что образец не намагничен до насыщения (т.к. рабочая частота обычно фиксирована и составляет около 10 ГГц). Однако геометрия измерения позволяет легко менять форму, размеры и ориентацию измеряемого образца.

Альтернативным вариантом измерения СВЧ свойств магнитного образца может быть измерение частотной зависимости комплексной магнитной проницаемости  $\mu$  при приложении фиксированного внешнего постоянного магнитного поля [1]. Магнитная проницаемость образца может быть измерена в коаксиальной линии в диапазоне частот от 0,1 до 20 ГГц с высокой точностью и при более высоких полях по сравнению со стандартной схемой ФМР, и результаты будут соответствовать лучшему приближению к намагниченному состоянию образца. Однако форма коаксиального образца такова, что он намагничивается неоднородно, что вносит погрешность в результат измерения.

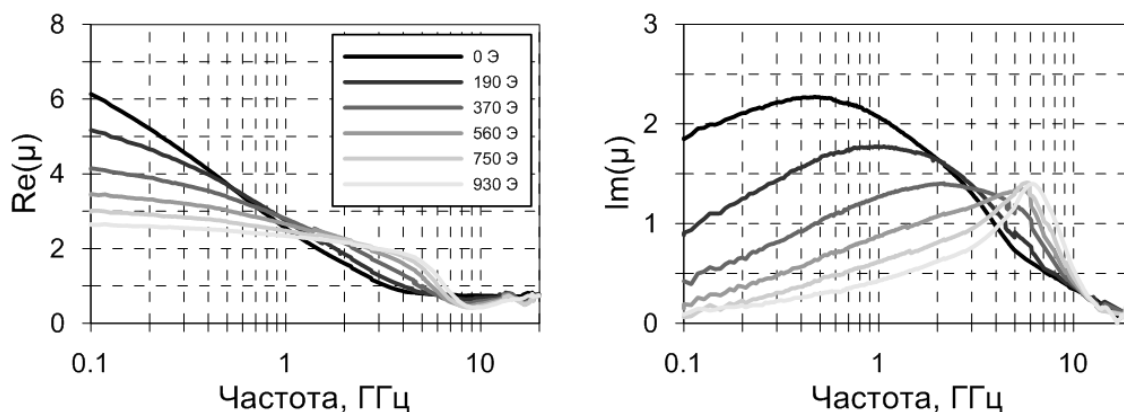
Численное решение задачи размагничивания коаксиальной шайбы представлено в [2], где рассчитаны значения форм-факторов в направлении оси коаксиала. Влияние размагничивания на коаксиальный образец из скрученной в рулон ленты из пленки Fe-N, наклеенной на гибкую лавсановую подложку, показано на рисунке 1, где представлена частотная зависимость действительной части магнитной проницаемости при различных значениях напряженности внешнего постоянного магнитного поля и различных толщинах образцов. Видно, что из-за размагничивания частота ФМР для образцов разной толщины отличается. При увеличении напряженности внешнего поля эта разница уменьшается в связи с уменьшением статической магнитной проницаемости. Результат эксперимента согласуется с теорией.

Также представляют интерес измерения комплексной магнитной проницаемости композитных материалов во внешнем постоянном магнитном поле. Были измерены частотные зависимости магнитной проницаемости

композитных материалов, содержащих порошок сендаста, при приложении внешнего постоянного магнитного поля (Рис. 2). Исследовано влияние объемного содержания и формы частиц на СВЧ магнитные свойства композита. Из полученных данных найдены поле анизотропии и намагниченность насыщения частиц сендаста. Показано, что за счет размагничивания поле внутри композитного материала уменьшается в зависимости от форм-фактора и магнитной восприимчивости образца.



**Рис. 1.** Частотная зависимость действительной части магнитной проницаемости образцов на основе тонких пленок во внешнем постоянном магнитном поле: 1 – 0 Э, 2 – 190 Э, 3 – 560 Э, 4 – 750 Э (черным линиям соответствуют образцы толщиной 5,4 мм, серым – 2,5 мм)



**Рис. 2.** Частотная зависимость действительной и мнимой части магнитной проницаемости композитного материала на основе порошка сендаста при различных значениях напряженности внешнего постоянного магнитного поля

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] S.N. Starostenko, K.N. Rozanov, PIER C, Vol. 8, 43–55, 2009.  
 [2] M. Beleggia et al, J. Magn. Magn. Mater., Vol. 321, no. 9, May 2009, pp. 1306–1315.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОМПОЗИТОВ  
НА ОСНОВЕ ПАРАФИНОВОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАТРИЦЫ  
ДЛЯ КОРРЕКТНОЙ ОЦЕНКИ ОБЪЁМНОГО НАПОЛНЕНИЯ**

**Д.А. Петров, С.С. Маклаков, К.Н. Розанов**

ИТПЭ РАН

При сравнении свойств композитных материалов с формулами смешения важным параметром является объёмная концентрация наполнителя, корректная оценка которой представляется нетривиальной практической задачей. При смешивании порошка наполнителя с диэлектрической матрицей возникает ряд проблем, таких как неконтролируемое попадание воздуха в смесь, обеспечение однородности и изотропности получаемого композита и др. Для корректного определения объёмного содержания наполнителя необходимо с высокой точностью знать плотность частиц, нахождение которой связано с существенными практическими трудностями. Другой проблемой, требующей внимания, является неоднородность плотности материала диэлектрической матрицы.

Для измерения СВЧ материальных параметров композита, после смешивания необходимо придать образцу форму для полного заполнения сечения волновода, что также вносит определённую погрешность в измерения из-за возможного наличия зазоров между стенками волновода и материалом образца. Иногда в литературе применяется метод определения количества магнитного наполнителя при помощи магнитометрических исследований — измеряя величину намагниченности насыщения композита, можно оценить количество магнитной фазы в материале, но при этом сам наполнитель должен быть магнитным и должна быть точно известна величина его намагниченности насыщения.

В работе приведена методика вычисления объёмной концентрации, проанализированы источники погрешностей и их влияние на исследуемые СВЧ материальные параметры.

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВЧ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ МЕТАЛЛА ПО ИЗМЕРЕННЫМ ЧАСТОТНЫМ ЗАВИСИМОСТЯМ МАТЕРИАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОМПОЗИТОВ НА ПРИМЕРЕ КОМПОЗИТОВ С ПОРОШКАМИ СЕНДАСТА

С.Н. Старостенко<sup>1</sup>, К.Н. Розанов<sup>1</sup>, А.О. Ширяев<sup>1</sup>, А.Н. Лагарьков<sup>1</sup>,

А.Н. Шалыгин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ИТПЭ РАН

<sup>2</sup>ИМЕТ РАН

Рассмотрен метод определения СВЧ магнитной проницаемости металла из магнитных спектров композитов на примере композита на основе парафина, наполненного сферическими или пластинчатыми частицами сендаста (сплава  $Al_{0.054}Si_{0.096}Fe_{0.85}$ ). Средний диаметр сферических частиц порядка 4 мкм, толщина пластинок около 1 мкм, средний диаметр пластинок около 50 мкм. Форма и размер частиц оценены с помощью электронного микроскопа и лазерного анализатора Analysette 22. Измерения диэлектрической  $\varepsilon_{mix}$  и магнитной  $\mu_{mix}$  проницаемостей композитов проведены методом прохождения/отражения в коаксиальной ячейке в полосе частот 0.1–20 ГГц. Проанализировано влияние размера, формы и концентрации частиц наполнителя на дисперсионные зависимости  $\varepsilon_{mix}$  и  $\mu_{mix}$ .

Определение магнитной проницаемости частицы  $\mu_{incl}$  выполнено в рамках обобщенной модели Максвелл Гарнетта (формула Оделевского) [1].

$$\varepsilon_{mix} = \varepsilon_h + \frac{\varepsilon_h p}{(1 - p/p_c)N + \varepsilon_h/(\varepsilon_{incl} - \varepsilon_h)} \approx \varepsilon_h + \frac{\varepsilon_h p}{(1 - p/p_c)N} \quad (1)$$

Обобщение учитывает наличие порога протекания – концентрации включений  $p_c$ , при которой появляется бесконечный кластер, а смесь претерпевает структурное превращение из матричной (тип Максвелл Гарнетта) в симметричную (тип Брюгемана). В уравнении Максвелл Гарнетта порог протекания равен единице  $p_c=1$ , в то время как в уравнении (1) порог протекания  $p_c$  – параметр, определяемый из эксперимента. Уравнение (1) описывает поведение диэлектрической проницаемости смеси в зависимости от объёмной доли  $p$  и формы включений, диэлектрической проницаемости включений  $\varepsilon_{incl}$  и связующего  $\varepsilon_h$ . Предполагается, что включения имеют форму вытянутых или сплюснутых эллипсоидов вращения, форма которых характеризуется фактором деполяризации  $N$ .

Поскольку проводимость металла велика (порядка  $10^8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ), слагаемое  $\varepsilon_h/(\varepsilon_{incl} - \varepsilon_h)$  мало по сравнению с величиной  $(1 - p/p_c) \times N$  и выражение (1) может быть упрощено, как показано в правой части выражения (1). Аналогичное уравнение,

$$\mu_{\text{mix}} = 1 + \frac{p}{(1 - p/p_c)N + 1/(\mu_{\text{incl}} - 1)}, \quad (2)$$

описывает магнитную проницаемость смеси в зависимости от порога протекания  $p_c$ , магнитной проницаемости  $\mu_{\text{incl}}$  и формы включений, но, в отличие от выражения (1), член  $1/(\mu_{\text{incl}} - 1)$  обычно близок  $(1 - p/p_c) \times N$ .

Разница между электрической и магнитной восприимчивостью металлов позволяет оценить их внутреннюю магнитную проницаемость в СВЧ диапазоне, где толщина скин-слоя не превышает нескольких микрон. Расчеты  $\mu_{\text{incl}}$  проведены для изотропных смесей, наполненных сферическими или пластинчатыми частицами.

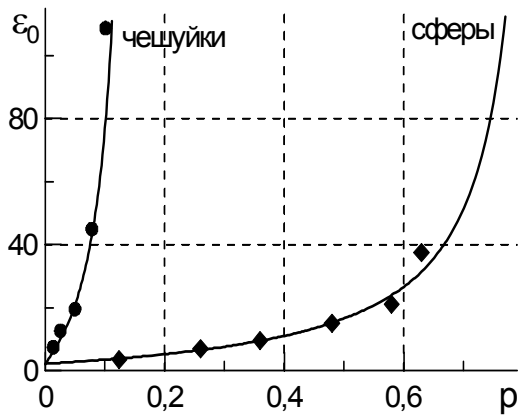
Концентрационная зависимость диэлектрической проницаемости смесей, измеренная на 100 МГц, показана на Рис.1 кружочками и квадратиками для пластинчатых и сферических частиц, соответственно. Линии представляют кривые диэлектрической проницаемости, рассчитанные с помощью выражения (1) с  $N$  и  $p_c$  в качестве параметров, подбираемых из экспериментальных данных. Подобранные значения коэффициента деполяризации  $N_{\text{flk}} = 0.00854$  и  $N_{\text{sph}} = 0.188$  хорошо согласуются с данными оптической и электронной микроскопии. Подобранные значения порога протекания  $p_c = 0.152$  и  $p_c = 0.839$ , также согласуются с формой частиц: чем более сплюснуты частицы, тем ниже  $p_c$ . Оценка квазистатической магнитной проницаемости частиц наполнителя дает для чешуек  $\mu_{\text{incl}} \approx 150$ , а для сфер  $\mu_{\text{incl}} \approx 60$  (Рис.2, черные линии).

Измеренные частотные зависимости магнитной проницаемости для смесей с пластинчатыми и сферическими частицами с примерно одинаковыми значениями статической диэлектрической проницаемости (Рис.2) показывают, что форма линии и частота пика магнитного поглощения композита сильно зависят от формы включения. Частота поглощения смесей с сендастом ниже, чем смесей с карбонильным железом [1], а значения магнитной проницаемости, измеренные на частоте 100 МГц (нижний предел для метода отражения-прохождения), далеки от статических. Из Рис.3 видно, что для смесей с пластинчатыми частицами действительная часть проницаемости резко растет с уменьшением частоты ниже 100 МГц ( $\text{tg } \delta_{\mu} \approx 0.2$ ), в то время как проницаемость смеси со сферами гораздо ближе к насыщению ( $\text{tg } \delta_{\mu} \approx 0.06$ ), что, по-видимому, и обуславливает различие квазистатической магнитной проницаемости  $\mu_{\text{incl}}$  сфер и чешуек.

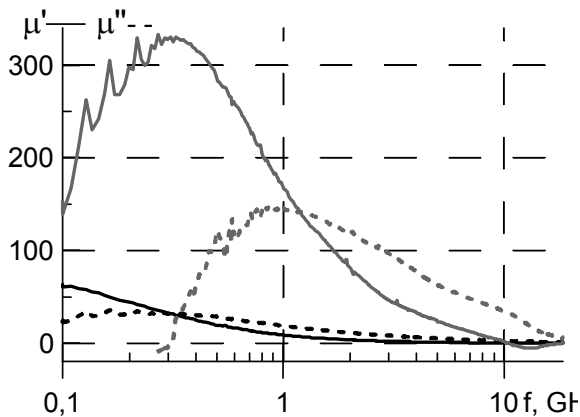
Может показаться, что для исследуемых порошков сендаста скин-эффект незначителен по сравнению с порошками карбонильного железа аналогичного размера, так как удельное сопротивление сендаста в шесть раз выше, чем железа, а частота поглощения (0.8–3 ГГц) достаточно низка. Однако расчет собственной проницаемости с учетом скинирования на



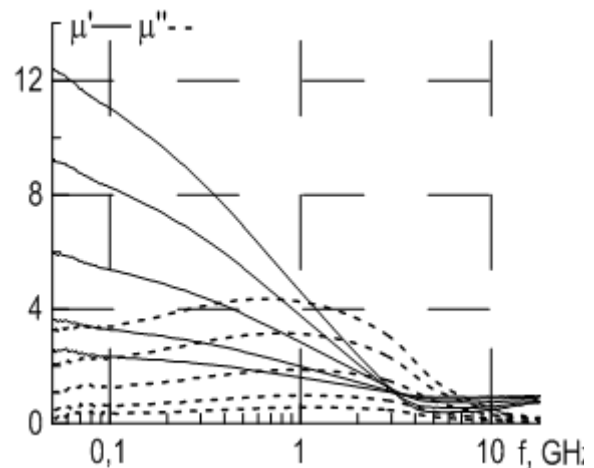
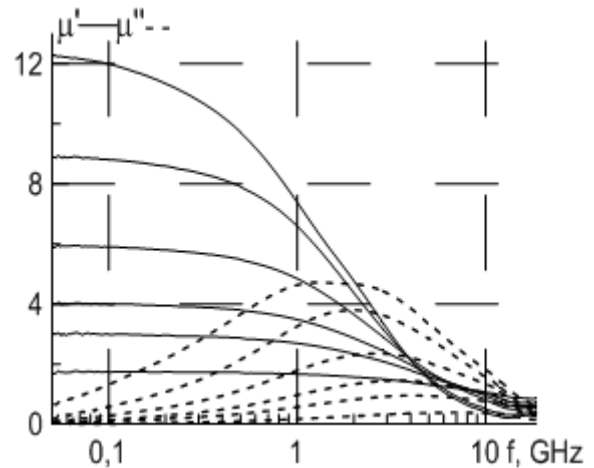
плоскости или сфере согласно [2] показал, что даже на частотах ниже 1 ГГц магнитная проницаемость частиц  $\mu_{incl}$  оказывается заметно меньше проницаемости составляющего их сплава. При этом статическая проницаемость сендаста может достигать 300 (Рис.3), что заметно ниже значений [3], полученных для объемных образцов.



**Рис. 1.** Измеренные (точки) и рассчитанные (линии) значения статической диэлектрической проницаемости композитов



**Рис. 2.** Расчетные магнитные спектры сферических частиц (черные линии) и материала частиц (серые линии)



**Рис. 3.** Измеренные магнитные спектры композитов со сферами (сверху) и чешуйками (снизу) сендаста

Проведенные исследования показали, что и пластинчатые, и сферические частицы сендаста являются перспективными наполнителями для РПМ метрового диапазона.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] K.N. Rozanov, A.V. Osipov, D.A. Petrov, S.N. Starostenko, E.P. Yelsukov, J. Magn. Magn. Mater. 321 738–741 (2009).
- [2] L. Lewin, Theory of Waveguides, John Wiley & Sons, 1975.
- [3] R.M. Bozorth, "Ferromagnetism", IEEE Press, New York, 1993.

## **МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ АППАРАТОВ КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ**

**А.Е. Михайлицын, А.В. Гусев, К.А. Маилян, И.А. Рыжиков**

**ИТПЭ РАН**

В обеспечение потребностей космической отрасли были разработаны три типа многофункциональных покрытий.

В течение ряда лет идут работы по созданию термостабилизирующих покрытий для главного и вторичного зеркал телескопа космического базирования Т-170М. Эти покрытия необходимы для уменьшения искажения анализируемого излучения и предотвращения конденсации на оптической поверхности паров органических соединений. Термостабилизация осуществляется при помощи разработанного пленочного нагревателя резистивного типа сложной формы. Разработанное многослойное покрытие, являющееся пленочным нагревателем, обеспечивает однородность температурного поля по всей поверхности зеркала не более 2 °С. Готовый нагреватель представляет собой оксидированную алюминиевую пластину, покрытую поли-*p*-ксилиленом, используемым в качестве изолятора. Электронагревательный контур наносится методом магнетронного распыления. Затем он закрывается защитно-изолирующим слоем поли-*p*-ксилилена. После каждого этапа нанесения покрытий производился отжиг для стабилизации состояния проводящего контура.

Для параболических углепластиковых антенн космического базирования разработана методика нанесения оптического алюминиевого покрытия с помощью магнетронного распыления на крупногабаритные детали диаметром 1,5 метра. Покрытие одновременно обеспечивает защиту от атомарного кислорода, разрушающего тело антенны, снижает воздействие солнечного излучения, а также улучшает коэффициент отражения в СВЧ диапазоне в обеих поляризациях. Методика позволяет получать покрытия толщиной около 0,3 мкм с равномерностью по всему диаметру антенны не более 5% и следующими оптическими характеристиками: излучательная способность  $\epsilon$  не более 0,05; коэффициент поглощения солнечного излучения  $A_s$  не более 0,1.

Интергелиозонд – космический аппарат, разработанный для полета к солнцу. Зонд будет работать на орбите радиусом около 20 диаметров солнца. Для защиты от солнечного излучения в конструкции объекта предусмотрен многослойный тепловой экран. Одной из ключевых проблем космического материаловедения является газо- и пылевыделение. Материалом для экрана служит пористый многослойный углерод-углеродный (С-С) материал, обладающий высоким газосодержанием. Для снижения

газовыделения разработано углеродное покрытие на основе поли-п-ксилилена. Покрытие наносится в два этапа, сначала в вакууме осаждается поли-п-ксилилен, закрывая за счет высокой проникающей способности поры углепластика, затем на втором этапе производится высокотемпературный отжиг, удаляющий все органические соединения из покрытия. В процессе отжига поли-п-ксилилен графитизируется. Таким образом, получена методика снижения газовыделения пористых материалов, работающих при высоких температурах посредством закрытия пор неорганическим полимерным покрытием.

## ТОНКИЕ ПЛЁНКИ VO<sub>2</sub> НА ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ КОРУНДОВОЙ ПОДЛОЖКЕ

**В.И. Полозов<sup>1,2</sup>, С.С. Маклаков<sup>1</sup>, С.А. Маклаков<sup>1</sup>, И.А. Рыжиков<sup>1</sup>,  
М.В. Седова<sup>1</sup>, А.Д. Мишин<sup>1</sup>, С.Н. Старостенко<sup>1</sup>, В.А. Амеличев<sup>3</sup>,**

**В.Н. Кисель<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>ИТПЭ РАН

<sup>2</sup>МФТИ (ГУ)

<sup>3</sup>ЗАО «СуперОкс»

Получены тонкие плёнки VO<sub>2</sub>, величина контраста сопротивления которых при различной температуре  $R_{30}/R_{90}$  составляет 500 раз. Толщина плёнок составляет 120 нм. Использована прямоугольная поликристаллическая корундовая подложка размером 5×6 см. Поверхностное сопротивление плёнок меняется при нагреве от  $R_{30} \sim 9 \cdot 10^5$  Ом·□ до  $R_{90} \sim 2 \cdot 10^3$  Ом·□. Использован двухстадийный метод получения с реактивным магнетронным распылением ванадия и последующим отжигом.

Дополнительный отжиг плёнок вызывает перекристаллизацию фазы VO<sub>2</sub>. Этот отжиг проводится при более высокой температуре и по более сложной программе, чем возможно осуществить в вакуумной камере при нанесении. Перекристаллизация плёнок необходима, поскольку магнетронное распыление, в том числе, с осаждением на горячую подложку, формирует кристаллиты оксида размером менее 100 нм. Для достижения значимых значений электрических характеристик необходимо повышать эту величину насколько возможно.

Обнаружено, что наибольший контраст сопротивления плёнок VO<sub>2</sub> формируется при циклическом отжиге с нагревом до 720°C. Время выдержки существенного влияния на свойства не оказывает. Использование аргона более высокой чистоты (марка 5.5 против 4.8) позволяет проводить более длительные процессы. Перегрев плёнок выше указанной температуры приводит к их разрушению. Выдержка при меньшей температуре не вызывает перекристаллизацию. Отжиг увеличивает размер кристаллитов до ~300 нм. Вместе с этим возрастает шероховатость поверхности покрытия. Эти наблюдения подтверждают выдвинутую ранее гипотезу, основанную на существовании в системе V-O перитектической изотермы. Из этого следует, что, помимо изменения размеров кристаллитов VO<sub>2</sub>, в результате такого термического воздействия, происходит изменение локального состава плёнки с увеличением доли VO<sub>2</sub>. Существует предельное значение контраста сопротивления. Дальнейший отжиг не улучшает характеристик таких плёнок.

Нагрев подложки при нанесении способствует формированию оксидных фаз VO<sub>x</sub>. При нагреве подложки до 400°C плёнки VO<sub>2</sub> могут быть

получены в диапазоне содержаний кислорода в газовой смеси 4-10%, без нагрева этот диапазон составляет ~2%. Оптимальное содержание кислорода с точки зрения контраста свойств  $\text{VO}_2$  зависит от электрического смещения на подложке. Описание этого эффекта в литературе отсутствует. Причина варьирования оптимального состава газа от смещения объясняется перераспылением растущей плёнки и изменением химической активности кислорода при разных характеристиках газового разряда.

Известно, что температура перехода  $\text{VO}_2$  между состояниями с разным сопротивлением и ширина гистерезиса этого перехода зависят от внутренних напряжений в плёнке. Однако эти два параметра остаются неизменными для плёнок с указанным контрастом. Вероятно, при размере кристаллитов  $\text{VO}_2$  200-300 нм происходит релаксация напряжений, нивелирующая данное влияние. При этом состав плёнок, формирующийся на стадии распыления, влияет на величину электрического сопротивления плёнки в обоих состояниях  $R_{30}$  и  $R_{90}$  в пределах порядка величины.

Получение образцов достаточного размера позволило провести измерение температурной зависимости коэффициента пропускания СВЧ излучения в частотном диапазоне 6-20 ГГц. Измерение проводили квазиоптическим методом с использованием печи с радиопрозрачными окнами. Коэффициент пропускания образца при нагреве от 30°C до 90°C уменьшается на 0,5 - 1 дБ. При охлаждении измеренный таким образом коэффициент пропускания демонстрирует гистерезис по температуре. Ширина гистерезиса, температуры начала и конца скачкообразного изменения этой характеристики совпадают с гистерезисом сопротивления, измеренным контактным способом.

Получение плёнок  $\text{VO}_2$  на поликристаллической подложке существенно расширяет возможности их практического применения по сравнению с плёнками, выращенными на эпитаксиальном сапфире.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 16-33-01089 мол\_а).

**ФОТОАКТИВНЫЕ НАНОКОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ  
ФЕНИЛЗАМЕЩЁННОГО НАФТАЛОЦИАНИНА ЦИНКА И  
ПОЛИФЕНИЛЕНВИНИЛЕНА**

**Е.Ф. Петрусевич<sup>3</sup>, К.А. Талалаев<sup>1,2</sup>, А.Е. Михайлицын<sup>1</sup>,  
С.С. Маклаков<sup>1</sup>, Т.В. Дубинина<sup>3,4</sup>**

<sup>1</sup>ИТПЭ РАН

<sup>2</sup>МФТИ (ГУ)

<sup>3</sup>МГУ имени М.В. Ломоносова, Химический факультет

<sup>4</sup>ИФАВ РАН

Один из способов повышения эффективности органических фотовольтаических ячеек – оптимизация строения объёмного гетеропереходного слоя. Этот слой представляет собой нанокompозитный материал, состоящий из органических полупроводников с разными типами проводимости. Настоящая работа посвящена исследованию гетеропереходных слоёв, полученных с использованием замещённого полифениленвинилена и фталоцианинов. Фталоцианин в такой системе выполняет роль фотоактивного источника носителей зарядов. Полимер образует проводящую матрицу, обладающую преимущественно электронной проводимостью.

Для получения исследуемого материала использовали фенилзамещённый нафталоцианинат цинка и два варианта полимера: МЕН-PPV и децилокси-замещённый полимер ((DEC)<sub>2</sub>PPV). Полимеры обладают разной средней молекулярной массой и растворимостью в органических растворителях. Композит на основе МЕН-PPV получали из раствора в толуоле. Композит на основе (DEC)<sub>2</sub>PPV получали из горячего раствора в о-дихлорбензоле. В обоих случаях в качестве дополнительного электроноакцепторного компонента использовали фуллерен C<sub>60</sub>. Для получения однородного по толщине слоя приготовленные растворы накапывали на подложку и помещали в вакуум (10<sup>-2</sup> мм рт. ст.) для лиофильной сушки. Такой подход позволяет работать с навесками компонент менее 1 мг. В результате получают плёнки композитов толщиной ~300 мкм с полимерной матрицей и включениями фталоцианина размером порядка 1 мкм. Присутствие фуллерена приводит к понижению однородности плёнки. Растворы на основе (DEC)<sub>2</sub>PPV обладают большей вязкостью по сравнению с МЕН-PPV, поэтому плёнки, полученные из них, характеризуются большей толщиной (~400 мкм).

Электропроводность плёнок измеряли при помощи встречно-штыревых электродов с зазором 100 мкм. Плёнки демонстрируют нелинейную вольт-амперную характеристику и обладают сопротивлением

$\sim 10^9$  Ом·см. Фоторезистивный отклик наиболее эффективной композиции составляет  $R_{\text{dark}}/R_{\text{light}} = 40$ . Слой на основе МЕН-PPV обладает меньшим сопротивлением по сравнению с  $(\text{DEC})_2\text{PPV}$ . Годограф импеданса в координатах Найквиста для МЕН-PPV-композиита представляет собой часть окружности. Расчёт характеристик эквивалентного RC контура даёт значения химической ёмкости  $C_{\text{chem}} = 1.8 \cdot 10^{-11}$  Ф и сопротивление рекомбинации  $R_{\text{rec}} = 2.5 \cdot 10^9$  Ом, что сопоставимо с исследованными ранее композиитами с субфталоцианином [1].

На основе плёнок с  $(\text{DEC})_2\text{PPV}$  получена многослойная структура на стеклянной подложке: стекло – ITO – гетеропереход –  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ . Такая структура имеет характерную вольт-амперную характеристику гетероперехода. Трудность в получении многослойной структуры состоит в неоднородности гетеропереходного слоя, вследствие которой происходит электрической контакт между прозрачным и металлическим электродом. Для измерения фотovoltaических свойств необходима дополнительная оптимизация структуры полученной ячейки.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты №16-33-01089 и 16-33- 60005).

## ЛИТЕРАТУРА

[1] S.S. Maklakov, T.V. Dubinina, M.M. Osipova, E.F. Petrusevich, A.D. Mishin, L.G. Tomilova. A novel hybrid blend based on phenoxy-substituted boron subphthalocyanine for organic photodetectors. // J. Porphyrins and Phthalocyanines 2016 (20) 1134-1141.

# КОМПЕНСАЦИЯ ВЛИЯНИЯ ОБТЕКАТЕЛЯ ЛА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ФАР. МЕТОДЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НА АПЕРТУРЕ ФАР ПОД ОБТЕКАТЕЛЕМ

В.И. Гриднев

НИИП им. В.В. Тихомирова

Требования, предъявляемые к современным обтекателям, являются достаточно высокими, а их конструкции – сложными, отягощенными дополнительными устройствами: молниезащиты, курсо-гладными антеннами, трубками ПВД, частотно-селективными экранами. Влияние обтекателя проявляется в искажении диаграммы направленности ФАР, в увеличении уровня боковых лепестков, в появлении пеленгационных ошибок. Причиной перечисленных явлений являются амплитудные и фазовые ошибки в распределении поля под обтекателем при падении волны с некоторого направления. В ФАР эти ошибки могут быть скомпенсированы путем изменения управляющих сигналов аттенюаторов и фазовращателей в канале каждого излучателя. Для оценки величин амплитудных и фазовых ошибок было выполнено математическое моделирование системы ФАР-осесимметричный обтекатель методом геометрической оптики. Суммарное поле в дальней зоне вычислялось как сумма полей отдельных излучателей, прошедших через обтекатель. При расчете коэффициентов прохождения волны через многослойную стенку обтекателя применялись стандартные допущения о локально плоском характере стенки. На рис.1 и 2 показаны распределения амплитудных и фазовых ошибок по апертуре ФАР, обусловленные обтекателем при падении волны с направления  $\theta=80^{\circ}$   $\varphi=20^{\circ}$ .

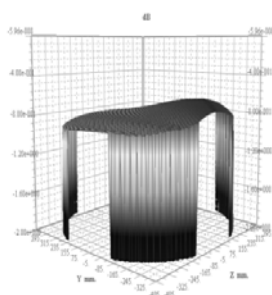


Рис. 1.

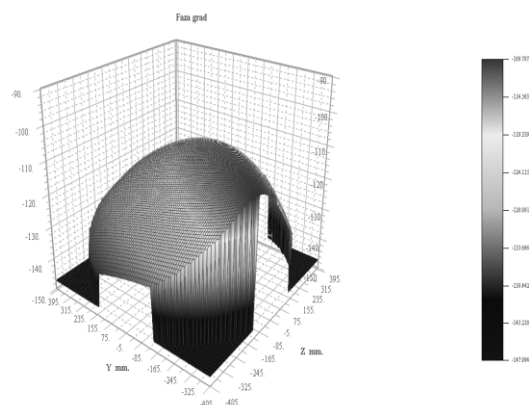
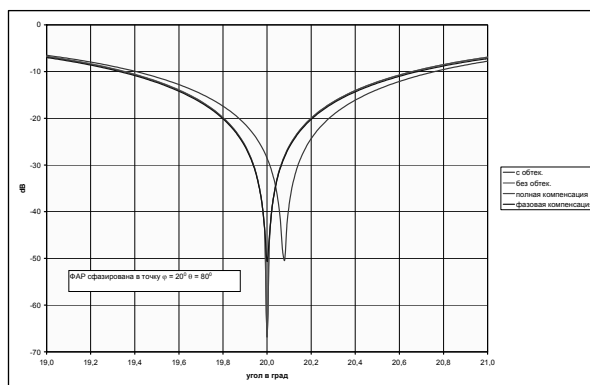


Рис. 2.



Расчеты показывают, что для выбранного осесимметричного обтекателя при падении волны вдоль оси обтекателя ( $\theta=90^\circ$   $\varphi=0^\circ$ ) величина амплитудных ошибок лежит в пределах 0.5 дБ., в направлении  $\theta=80^\circ$   $\varphi=20^\circ$  величина ошибок достигает 0.8 дБ., а в направлении  $\theta=45^\circ$   $\varphi=35^\circ$  максимальная амплитудная ошибка возрастает до 2 дБ. Диапазон фазовой ошибки для всех направлений лежит в пределах  $30^\circ$ . На рис.3 приведен пример компенсации ошибок для направления  $\theta=80^\circ$   $\varphi=20^\circ$ . При таком отклонении луча величина ошибки пеленга составляет 7'. Если скомпенсировать только фазовые ошибки, пеленгационную ошибку можно устранить, а в случае учета и амплитудных ошибок можно увеличить глубину провала разностной ДН, т.е. увеличить крутизну пеленгационной характеристики. При наличии обременений на обтекателе в виде проводов, антенн и т.д. эти ошибки могут вырасти. В этом случае маловероятно определение ошибок чисто расчетным путем.



**Рис. 3.**

В работе предлагается экспериментальный метод определения ошибок, состоящий в восстановлении поля под обтекателем. На рис.4 показана схема экспериментальной установки. Существует несколько методов восстановления поля. Наиболее простой состоит в поочередном измерении сигнала, принимаемого каждым излучателем, в то время как остальные нагружены на согласованные нагрузки. В этом случае искомая амплитуда волны на входе  $n$  того излучателя равна:  $f_n = U_{\Sigma n} / (W_n S_{\Sigma n})$ , где  $S_{\Sigma n}$  - элемент матрицы рассеивания с входа  $n$  на суммарный выход  $\Sigma$ ,  $U_{\Sigma n}$  - измеряемая комплексная амплитуда волны на суммарном выходе,  $W_n$  - весовой коэффициент канала.

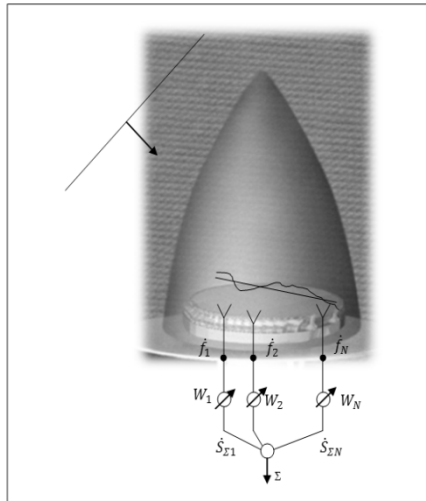


Рис. 4.

Другой метод восстановления состоит в проведении  $N$  измерений комплексной амплитуды волны на суммарном выходе при различных наборах векторов весовых коэффициентов  $U_k^k = \sum_n W_n^k f_n S_{\Sigma n}$ ,  $1 < k < N$ , и решении системы линейных уравнений относительно вектора  $f_n S_{\Sigma n}$ :  $\|W^k\| \cdot f_n S_{\Sigma n} = U_k^k$ . Самойленко М.В.[1] предложен метод восстановления поля, основанный только на измерении мощности сигнала на выходе ФАР. Здесь для получения устойчивого решения необходимо выполнить  $N^2$  измерений мощности выходного сигнала при различных комбинациях весовых коэффициентов. Для уменьшения размерности матрицы можно проводить измерения поочередно на отдельных фрагментах ФАР. Выбор метода в немалой степени определяется точностными особенностями методов.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Самойленко М.В. Восстановление амплитудно-фазового распределения поля принимаемого сигнала в раскрытой антенной решетке по измеренной мощности. - Радиотехника и электроника, 2009, т.54, №9, с.1058-1063.
- [2] Самойленко М.В. Томография и аэрокосмические системы. - М., Изд. МАИ, 2011.

# КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ЭПР ТЕЛ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ НА ОСНОВЕ ФИЗИЧЕСКОЙ ОПТИКИ, ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ И МЕТОДА ИНТЕГРАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ В 2D-ПРОСТРАНСТВЕ

В. В. Лесняк  
ЦАГИ

Рассмотрено построение комбинированного метода для расчета эффективной площади рассеяния (ЭПР) тел сложной формы на основе метода физической оптики (ФО) с двумя поправками. Первая поправка учитывает возможные переотражения полей, возникающее на невыпуклых телах. Вторая поправка учитывает вклад неравномерных токов, отличных от физоптического тока, возникающих в местах локальных неоднородностей поверхности. Программный модуль, разработанный на базе данного комбинированного метода, наряду с другими модулями включен в программный комплекс по расчету ЭПР тел сложной формы [1].

Как известно метод ФО применим, строго говоря, только для выпуклых тел. Поэтому, для расчета поправки на переотражения применим метод геометрической оптики (ГО). Методы ФО и ГО теоретически имеют один порядок точности, и, казалось бы, что метод ГО может полностью заменить метод ФО. Однако метод ФО имеет некоторые преимущества, связанные с особенностями алгоритма численной реализации на ЭВМ. И как показано ниже, эти различия позволяют построить эффективный комбинированный метод расчета ЭПР.

Практически все методы расчета ЭПР для вычисления рассеянного поля используют истокообразные представления полей. В обобщенном виде истокообразное представление полей можно записать следующим образом.

$$\vec{E}^s = \int_S \vec{f}(\vec{E}, \vec{H}) ds_q \quad (1)$$

где,  $S$  – поверхность тела,  $\vec{E}, \vec{H}$  – полные поля на поверхности тела

В обоих методах ФО и ГО значения полных полей на поверхности тела определяются по одной и той же приближенной формуле.

$$\vec{E} = \vec{E}^i + \vec{E}^r, \quad \vec{H} = \vec{H}^i + \vec{H}^r$$

где,  $\vec{E}^i, \vec{H}^i$  – падающее на поверхность поле,

$\vec{E}^r, \vec{H}^r$  – отраженное по законам геометрической оптики поле

При расчете  $\vec{E}^r, \vec{H}^r$  мы так же учитываем зависимость комплексных коэффициентов отражения на поверхности от угла падения и поляризации.

Различие в методах ФО и ГО заключается в способах численного вычисления интеграла (1). В методе ФО поверхность тела разбивается на треугольные панели. Критерием разбиения является ограничение на максимальное отклонение плоской панели от реальной формы поверхности. Это отклонение не должно превышать  $\lambda/30$ , где  $\lambda$  – длина волны. Тогда интеграл (1) можно представить в виде суммы интегралов по отдельным

панелям.

$$\vec{E}_{\phi_0}^s = \sum_{i_p}^{N_p} \int_{S_h} \vec{f}(\vec{E}, \vec{H}) d s_q \quad (2)$$

Причем интеграл по треугольной панели в (2) берется аналитически.

В методе ГО падающее поле разделяется на тонкие лучи, далее проводится трассировка каждого луча независимо. При этом полное поле на поверхности тела представляется в виде суммы вкладов каждого луча в каждом пятне отражения лучевой трубки от поверхности. Сокращенно это можно записать так.

$$\vec{E} = \sum \sum \vec{E}_L, \quad \vec{H} = \sum \sum \vec{H}_L$$

где,  $\vec{E}_L, \vec{H}_L$  – поле луча в точке пересечения с поверхностью

Подставим указанные выражения в интеграл (1) и учтем, что оператор  $\vec{f}(\square)$  линейный. Тогда для метода ГО выражение (1) приобретет вид.

$$\vec{E}_{\phi_0}^s = \sum_{i_L=1}^{N_L} \left\{ \sum_{i_n=1}^{N_n} \int_{S_{sc}} \vec{f}(\vec{E}_L, \vec{H}_L) d s_q \right\} \quad (3)$$

где,  $S_{sec}$  – пятно контакта луча на поверхности,

$N_L$  – количество лучей,  $N_n$  – количество переотражений луча

Разделим сумму на первое отражение лучей и все остальные.

$$\vec{E}_{\phi_0}^s = \sum_{i_L=1}^{N_L} \left\{ \int_{S_{sc}} \vec{f}(\vec{E}_L, \vec{H}_L) d s_q \right\}_{i_n=1} + \sum_{i_L=1}^{N_L} \left\{ \sum_{i_n=2}^{N_n} \int_{S_{sc}} \vec{f}(\vec{E}_L, \vec{H}_L) d s_q \right\}$$

Первая сумма соответствует методу ФО, т.к. в ней участвует первичная плоская волна от источника облучения тела. Введем обозначение поправки на переотражения.

$$\vec{E}_n^s = \sum_{i_L=1}^{N_L} \left\{ \sum_{i_n=2}^{N_n} \int_{S_{sc}} \vec{f}(\vec{E}_L, \vec{H}_L) d s_q \right\} \quad (4)$$

Тогда выражение (3) для метода ГО переходит в выражение для комбинированного метода учитывающего метод ФО (2) и поправку на переотражения (4).

$$\vec{E}_{\phi_0}^s = \vec{E}_{\phi_0}^s + \vec{E}_n^s \quad (5)$$

Основное преимущество полученного выражение (5) по сравнению с чистым методом ГО, описываемым выражением (3) заключается в существенном сокращении времени счета при равной погрешности. Для примера был проведен расчет ЭПР двух заостренных цилиндров состыкованных в виде креста, диаметр цилиндров 2 м, длина 10 м и 20 м. Длина волны облучения составляла 3 см. Время счета предложенным комбинированным методом сократилось в ~20 раз по сравнению с методом ГО. Сокращение времени счета связано с тем, что область учета

переотражений обычно существенно меньше поверхности всего тела, а это приводит к снижению требуемого количества лучей для расчета только переотражений. Меньшая область переотражений, приводит так же к меньшей интерференционной изрезанности диаграммы переотражений, что позволяет увеличить шаг расчета диаграммы переотражений. Оба этих фактора и приводят к существенному сокращению времени счета.

Теперь к выражению (5) добавим поправку на неравномерный ток на неоднородностях поверхности и получим полное выражение для описания предложенного комбинированного метода.

$$\vec{E}^s = \vec{E}_{z_0}^s + \vec{E}_{2D}^s = \vec{E}_{\phi_0}^s + \vec{E}_n^s + \vec{E}_{2D}^s \quad (6)$$

В методе ФО предполагается, что главные радиусы кривизны поверхности больше длины волны. Те локальные места поверхности, где не выполняется это условие, называются неоднородностями поверхности, а токи, отличающиеся от физоптического – неравномерными токами. Если только один главный радиус кривизны меньше длины волны, а другой много больше, то такую неоднородность мы называем 2D-неоднородностью.

2D-неоднородность по максимальному главному радиусу образует линию расположения неоднородности на поверхности объекта, а сечение в плоскости минимального радиуса определяет контур неоднородности в 2D-пространстве. Так как радиус кривизны линии расположения неоднородности много больше длины волны, то она легко аппроксимируется полилинией. На каждом ребре этой линии ищется эквивалентный электрический ток, излучение которого соответствует излучению неоднородности. В локальном базисе текущего ребра этот ток вычисляется следующим образом.

$$\vec{j}_{\text{эвб}}(z) = \frac{i2t_z}{Wk(\sin\gamma)^2} e^{ik(z_0 + z\cos\gamma)} f^1(\varphi) \hat{z} \quad (7)$$

где, параметры  $z_0, t_z, \gamma, \varphi$  – определяют положение локального базиса

Магнитный эквивалентный ток вычисляется аналогично, но с использованием функции  $g^1(\varphi)$ . Функции  $f^1(\varphi)$ ,  $g^1(\varphi)$  были впервые введены П.Я. Уфимцевым [2], который получил их в аналитическом виде для острого клина. Для неоднородности с сечением произвольной формы эти функции вычисляются численно на каждом ребре линии. Для этого в 2D-пространстве методом моментов решается задача по расчету тока на контуре неоднородности, при облучении волной с волновым вектором  $k_x = k \sin\gamma$ . Далее интегрируем по контуру неоднородности разность между найденным током и физоптическим следующим образом.

$$f^1(\varphi) = \frac{-ik}{2} \int_C \Delta \vec{j}(l_q) e^{ik(X_q \cos\varphi + Y_q \sin\varphi)} dl_q$$

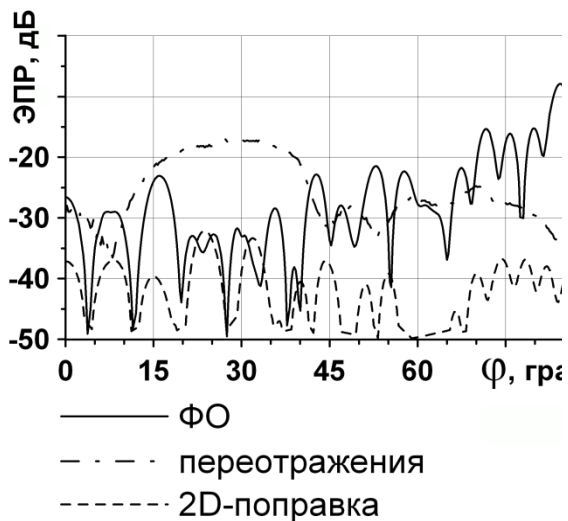
где,  $X_q, Y_q$  – координаты точки интегрирования на контуре

Расчет функции  $g^1(\varphi)$  производится аналогично, разница только в поляризации возбуждающего поля.

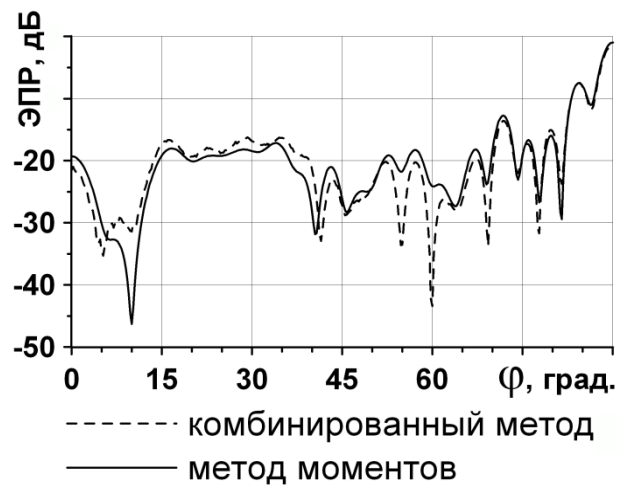
Для окончательного расчета поправки  $\bar{E}_{\Sigma}$  можно воспользоваться истокообразным представлением поля, в котором используются эквивалентные электрические (7) и магнитные токи под интегралом.

В качестве примера расчета комбинированным методом приведены диаграммы ЭПР для модели, состоящей из двух идеально проводящих цилиндров: диаметры цилиндров составляли 100 мм, длина 300 мм. Оси цилиндров повернуты под  $90^\circ$  друг к другу и сдвинуты на 110 мм, таким образом, минимальное расстояние между цилиндрами получилось 10 мм. Диаграмма ЭПР рассчитывалась в плоскости составляющей  $45^\circ$  к оси каждого цилиндра. Длина волны облучения – 3 см, поляризация горизонтальная.

На рис.1 приведены отдельно диаграммы ЭПР трех компонент комбинированного решения. После того, как все три компоненты рассеянных полей просуммировали с учетом фазы (6), была рассчитана полная диаграмма ЭПР, которая показана на рис.2. Для сравнения там же приведена диаграмма ЭПР рассчитанная методом моментов. Как видно различие диаграмм, если не учитывать интерференционные провалы, не превышает  $2\div 3$  дБ.



**Рис. 1.** Компоненты рассеянного поля



**Рис. 2.** Сравнение расчета комбинированным методом с расчетом методом моментов

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Дорохов М.В., Лесняк В.В. Развитие методов и программ расчета ЭПР тел сложной формы, Сб. науч. тр. «Проблемы создания перспективной авиационно-космической техники»/ М.:Физматлит, 2005.-С. 450-465.
- [2] Уфимцев П.Я. Метод краевых волн в физической теории дифракции, М.:Сов. радио, 1962 г.

## **ПРОГРАММА ДЛЯ ЮСТИРОВКИ ЗЕРКАЛА КОЛЛИМАТОРА С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО ТРЕКЕРА**

**С.А. Федоров**

ИТПЭ РАН

Лазерный трекер FARO Laser Tracker Xi позволяет измерять линейные размеры с точностью до 25 мкм для объектов размером 10 м. Для обработки результатов измерений с помощью трекера используется программа FARO CAM2 Measure. Эта программа является универсальной и специфичной, требует многоступенчатого подхода для калибровки, привязки и измерений. Для облегчения юстировки коллиматора была создана программа МАКTracker. Для написания программы необходимо было решить ряд геометрических задач:

- сопряжение различных систем координат (коллиматора, щитов, трекера, безэховой камеры),
- нахождение точки соприкосновения сферического отражателя с параболическим зеркалом,
- наилучшее встраивание в массив измеряемых точек (по СКО) параболоида зеркала с учетом конструктивных особенностей коллиматора.

Для программы также необходима наглядность вывода данных, удобство работы как с данными (обработка, интерпретация) так и с интерфейсом программы.

Программа МАКTracker в режиме измерения позволяет выводить координаты отражателя в системе трекера, коллиматора и щита. Для юстировки коллиматора программа вычисляет отклонение зеркала от идеальной поверхности в реальном масштабе времени. В режиме анализа данных программа показывает максимальные отклонения, СКО и результаты отклонений в доверительном интервале 95 %. По массиву измеренных данных программа по методу наименьшего СКО позволяет найти расположение зеркала в безэховой камере. По трем точкам на коллиматоре трекер привязывается к системе координат коллиматора, что позволяет быстро скорректировать измерения.

Программа была использована для юстировки коллиматора МАК-5. В докладе будут приведены данные по измерениям этого коллиматора и методике измерения и юстировки коллиматора.

# ОСОБЕННОСТИ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ ОТ ВОЗДУХОЗАБОРНИКА С ПОКРЫТИЯМИ

В.Н. Кисель

ИТПЭ РАН

Известно, что воздухозаборник (ВЗ) с установленным в его канале турбореактивным двигателем является одним из узлов, создающих основной вклад в рассеянное поле в передней полусфере летательного аппарата. Для расчета эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) ВЗ в ИТПЭ РАН ранее была разработана электродинамическая модель в виде вытянутой полости с достаточно произвольной формой поперечного сечения и, возможно, покрытием на стенках; полость может содержать и систему пластин, имитирующих элементы первой ступени двигателя [1-4].

Недавно эта модель прошла полноценное экспериментальное тестирование в рамках обширной программы исследований в ходе проведения поисковой НИР по выявлению преимуществ S-образных каналов в части обеспечения требуемых характеристик обратного рассеяния. Экспериментальные модели включали и каналы с раструбом, для которых характерны некоторые особые электромагнитные явления, в частности, «запирание» канала [4] и связанный с этим повышенный уровень ЭПР при неправильном подборе параметров покрытий или при их отсутствии.

В докладе рассматриваются результаты расчетных исследований и экспериментального тестирования модели при использовании различных конфигураций макетов каналов ВЗ, в том числе прямолинейных, S-образных, с покрытиями и с имитатором входного устройства двигателя. Исследована эффективность применения различных покрытий, а также изучены схемы их частичного нанесения. Представлены соответствующие диаграммы, позволяющие оценить влияние геометрического расположения покрытия в канале на пространственные диаграммы ЭПР.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] *V.N. Kisel', A.I. Fedorenko*. Electromagnetic scattering from cavities with complex objects inside//Conf. Proc. 2000 Int. Conf. on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET2000), Kharkov, Ukraine, Sept. 11 15, 2000. V.2. P.447-449.
- [2] *V.N. Kisel', A.I. Fedorenko*. Electromagnetic modeling of the jet aircraft intake with the interior impeller// Conf. Proc. 2002 Int. Conf. on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET\*02), Kiev, Ukraine, Sept. 10 13, 2002. V.2. P.508-510.



[3] *В.Н. Кисель*. Расчет отражения электромагнитной волны от входного устройства авиационного двигателя // Пятнадцатая ежегодная научная конференция ИТПЭ РАН при поддержке IEEE-APS-LEOS-CHAPTER. Сборник тезисов докладов. Под редакцией д.ф.-м.н. В.Н. Киселя – М.: ИТПЭ РАН. 2014. С. 42.

[4] *В.Н. Кисель*. Расчет рассеяния электромагнитных волн полостью с раструбом // Семнадцатая ежегодная научная конференция ИТПЭ РАН при поддержке IEEE-APS-LEOS-CHAPTER. Сборник тезисов докладов. Под редакцией д.ф.-м.н. В.Н. Киселя – М.: ИТПЭ РАН. 2016. С. 44-45.

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЯ В РУПОРНОЙ КАМЕРЕ С ЛИНЗОЙ С ОПТИМИЗИРОВАННЫМ ПРОСВЕТЛЯЮЩИМ СЛОЕМ

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

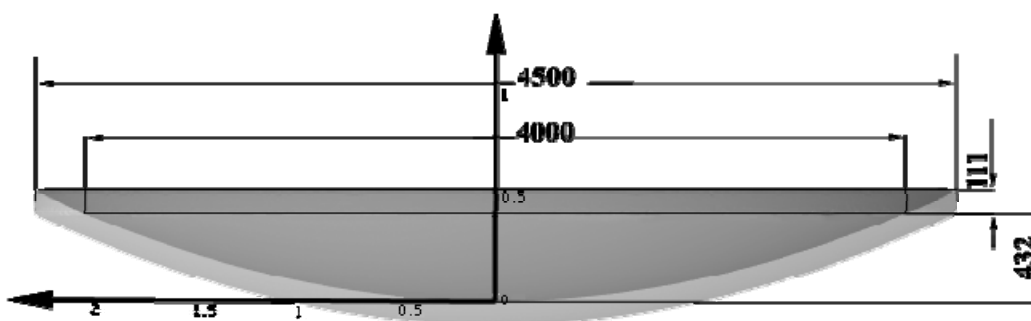
<sup>1</sup>ИТПЭ РАН

<sup>2</sup>МФТИ (ГУ)

Ранее [2] нами исследовалось поле в рабочей зоне рупорной камеры с линзой, покрытой с двух сторон просветляющим слоем. Линза устанавливается в апертуре рупорной части камеры и используется в диапазоне частот 0.1 – 1 ГГц. Было показано, что в рабочей зоне камеры, представляющей собой горизонтально расположенный цилиндр диаметром 3 м и длиной 3 м, неравномерность поля составила 2-3 дБ в зависимости от частоты.

Однако выполнить просветление на искривленной поверхности технологически гораздо сложнее, чем на плоской. Кроме этого, наличие просветления на искривленной поверхности утяжеляет линзу примерно на 30%. В данной работе исследуются другие варианты нанесения просветления. Расчет распределения поля в рабочей зоне рупорной БЭК был выполнен строгим методом.

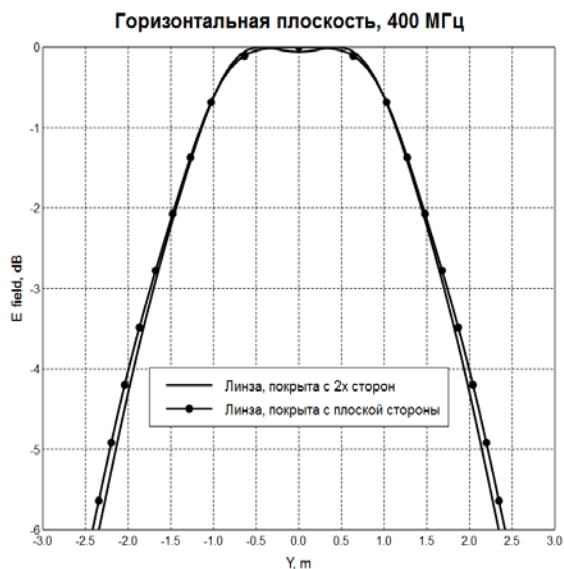
Линза выполнена из композитного материала с диэлектрической проницаемостью 1.6, материал не магнитный. Линза плосковыпуклая, диаметр 4 метра и с фокусом 17 метров (рис. 1). Плоская поверхность линзы покрыта просветляющим слоем для частоты 600 МГц: диэлектрическая проницаемость 1.265 и толщина 111 мм. Диаметр линзы с учетом просветляющего слоя 4.5 метра.



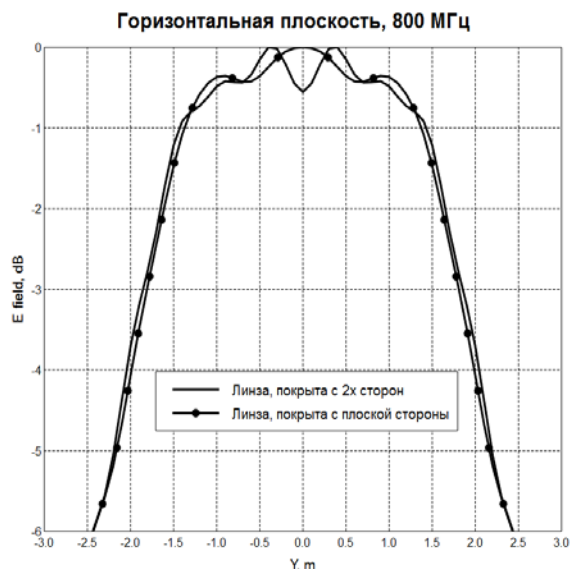
**Рис.1.** Линза с просветлением

Результаты расчета распределения амплитуды поля на частотах 400 МГц и 800 МГц представлены на рис. 2 и 3 для горизонтальной плоскости при вертикальной поляризации падающей волны. Приведено распределение поля в сечении, проходящем через центр рабочей зоне для линзы с

просветлением с двух сторон и только на плоской поверхности.



**Рис. 2.** Амплитудное распределение поля в рабочей зоне, частота 400МГц.



**Рис. 3.** Амплитудное распределение поля в рабочей зоне, частота 800МГц.

Из рисунков 2-3 видно, что распределения поля в рабочей зоне почти не отличается для линзы с просветлением на обеих сторонах и только на плоской поверхности. Просветление только на плоской поверхности выполнить проще, линза станет легче, а на точность измерений отсутствие просветляющего слоя на первой поверхности не влияет. Понятно, что отсутствие просветления на искривленной поверхности может увеличить неравномерность поля до линзы. Это влияет на обработку сигнала для измерения ЭПР объекта.

По результатам расчета можно заключить, что просветлять достаточно только плоскую поверхность линзы.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Балабуха Н.П., Зубов А.С., Солосин В.С. Компактные полигоны для измерения характеристик рассеяния. М.:Наука, 2007.
- [2] Балабуха Н.П., Меньших Н.Л., Солосин В.С. Моделирование электромагнитного поля в рупорной безэховой камере с линзой, покрытой с двух сторон просветляющим слоем. Семнадцатая ежегодная конференция ИТПЭ РАН (М.: 16-19 мая 2016).

## РЕЗУЛЬТАТЫ НАСТРОЙКИ И ИСПЫТАНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОМПАКТНОГО ПОЛИГОНА

В.С. Солосин, Н.П. Балабуха, А.С. Зубов, С.А. Федоров, В.Е. Яковлев  
ИТПЭ РАН

ИТПЭ РАН были выполнены работы по глубокой модернизации компактного полигона в ВКА им. А.Ф. Можайского. В результате анализа существующих параметров измерительного комплекса на основании опыта построения компактных полигонов и дополнительных расчетов была предложена программа модернизации с целью удовлетворения требованиям технического задания. В результате выполненных работ был изготовлен и заменен рефлектор коллиматора МАК5, изменена конфигурация безэховой камеры в области коллиматора, выполнена замена радиопоглощающего материала. Кроме того, была изготовлена система облучателей и устройство позиционирования объектов исследования в виде наклонного пилона.

Щиты рефлектора с прецизионной поверхностью были изготовлены и предварительно отсортированы на специализированном стенде в лаборатории с целью их оптимального расположения на рефлекторе коллиматора. После установки щитов на раму коллиматора была выполнена многопроходная юстировка поверхности рефлектора. Благодаря использованию координатно-измерительной машины FARO Laser Traker XI под управлением разработанной в лаборатории программы удалось обеспечить точность поверхности зеркала рефлектора, превышающую точность, заложенную в техническом задании.

Изменение профиля камеры вблизи фокальной оси коллиматора значительно снизило уровень паразитных переотражений и, соответственно, обеспечило качество поля, превышающее требования технического задания.

Радиопоглощающий материал, РАН-68 (разработка и изготовление института), был расположен в соответствии с разработанной схемой на периферии рефлектора для снижения дифракционных эффектов и обеспечил работу коллиматора заданной полосе частот.

Было разработано и изготовлено опорноповоротное устройство в виде наклонного пилона для позиционирования объектов массой до 300кг в диапазоне углов: азимут  $-360^{\circ}$ , наклон  $-35^{\circ} \div +5^{\circ}$ , точность установки угла  $40''$ .

Рабочую зону (горизонтальный цилиндр диаметром 1.8м и длиной 1.8м) во всем диапазоне ( $2.6 \div 40$ ГГц) обеспечивает комплект облучателей, включающий позиционер для поляризационной установки облучателя. Достигнутые результаты: - неплоскостность электромагнитного поля в сечении рабочей зоны не превышает по амплитуде:

в диапазоне 2.6.. .4 ГГц:  $\pm 1.5$  дБ;

в диапазоне 4...40 ГГц:  $\pm 1$  дБ.

Оценки показали, что при достигнутых точностях поверхности рефлектора, выбранной конфигурации безэховой камеры возможно расширение рабочего диапазона частот до 60ГГц.

В результате проведенных работ удалось полностью выполнить техническое задание и создать измерительный комплекс – компактный полигон, лучший из измерительных комплексов на базе коллиматора МАК5.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Балабуха Н.П., Зубов А.С., Солосин В.С. Компактные полигоны для измерения характеристик рассеяния. М.:Наука, 2007.
- [2] Никитенко А.В., Зубов А.С., Булычев Е.В. Расчет дифракции поля коллиматора на стенках БЭК и исследование влияния РПМ на неоднородность поля в рабочей зоне. Шестнадцатая ежегодная конференция ИТПЭ РАН (М.: 16-19 мая 2016).

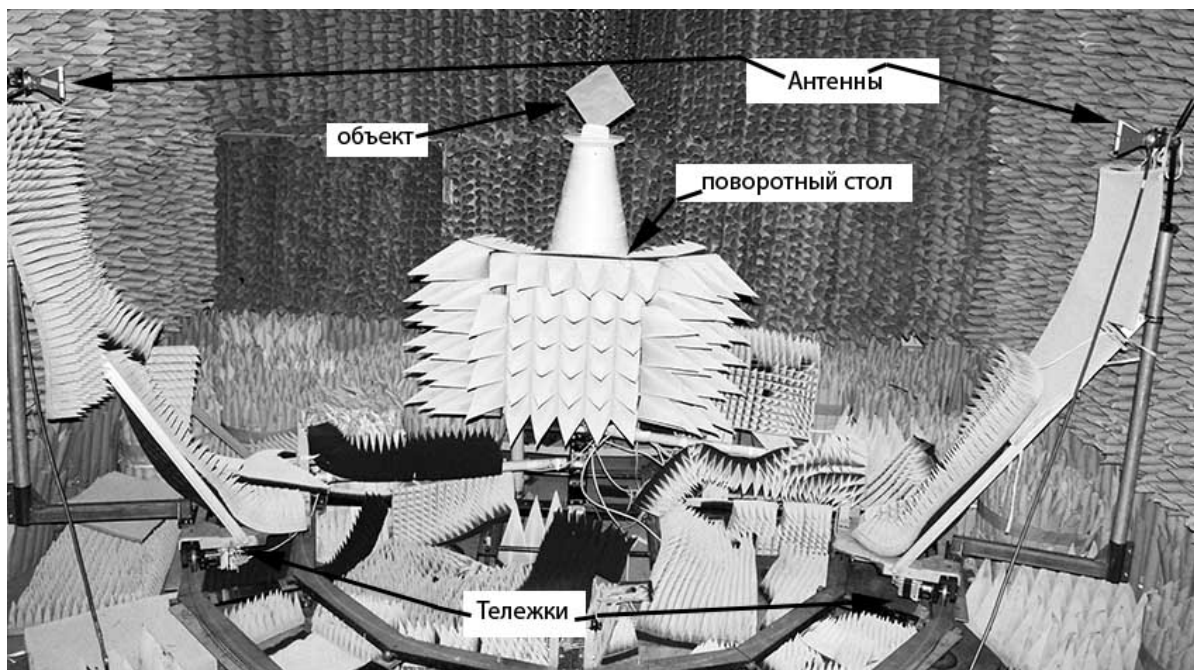
## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ БИСТАТИЧЕСКИХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАЛОРАЗМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ

С.А. Федоров<sup>1</sup>, Н.Л. Меньших<sup>1,2</sup>, Д.Е. Михель<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ИТПЭ РАН

<sup>2</sup>МФТИ (ГУ)

Для экспериментальных исследований бистатических характеристик малоразмерных объектов была проведена модернизация имеющегося оборудования в малой безэховой камере ИТПЭ РАН [1]. Стенд для исследования бистатических радиотехнических характеристик теперь позволяет измерять объекты в рабочей зоне 0.25x0.25 м в частотном диапазоне 5 ... 32 ГГц. Стенд имеет возможность управлять двумя измерительными антеннами и поворотным столом, на котором находится объект измерения. На рис. 1 представлена фотография стенда.

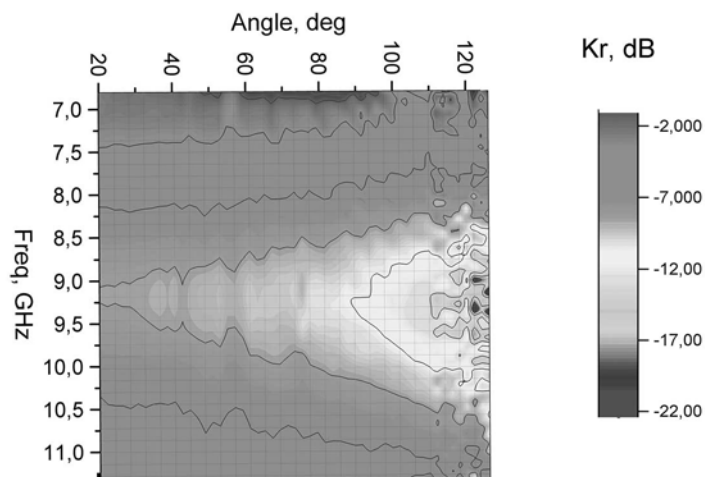


**Рис.1.** Стенд для исследований бистатических радиотехнических характеристик

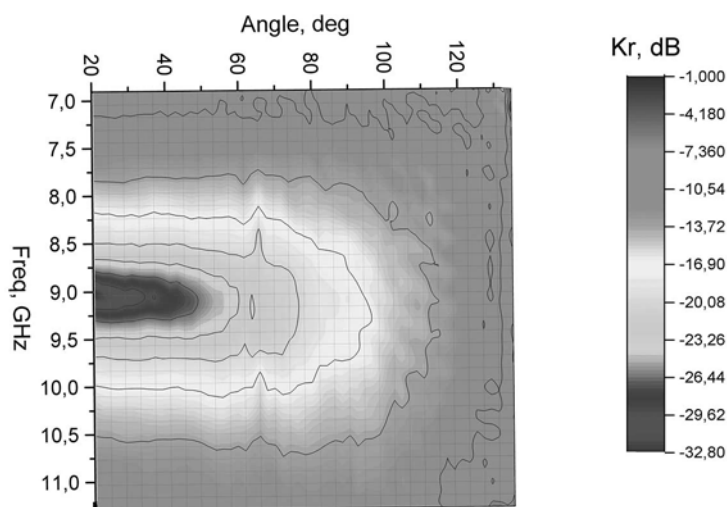
Измерение сигнала происходит с помощью векторного анализатора типа PNA компании Agilent. С помощью управляющего компьютера происходит обработка сигнала и построения радиотехнических характеристик.

В докладе рассмотрены влияние различных факторов на точность измерения параметров рассеяния, приводятся сравнения экспериментальных данных с теоретическими расчётами.

На рис. 2 и 3 в качестве примера результата измерения на стенде показана зависимость коэффициента отражения радиопоглощающего магнитного и диэлектрического покрытия от частоты и угла между измерительными антеннами при горизонтальной поляризации.



**Рис.2.** Зависимость коэффициента отражения для пластинки покрытой диэлектрическим РПМ от частоты и углом между антеннами



**Рис.3.** Зависимость коэффициента отражения для пластинки покрытой магнитным РПМ от частоты и углом между антеннами

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Балабуха Н.П., Зубов А.С., Меньших Н.Л. и др., Малый измерительный стенд. 14 Ежегодная научная конференция ИТПЭ РАН. Сборник тезисов докладов, М.2013.

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ ДВУХПОЗИЦИОННОЙ ЭПР КРУГОВОГО ЦИЛИНДРА В РУПОРНОЙ БЭК С КОЛЛИМАТОРОМ

Д.А. Коняев<sup>1,3</sup>, Н.П. Балабуха<sup>3</sup>, Н.Л. Меньших<sup>2,3</sup>, Н.Е. Шапкина<sup>1,3</sup>

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

<sup>2</sup>МФТИ (ГУ)

<sup>3</sup>ИТПЭ РАН

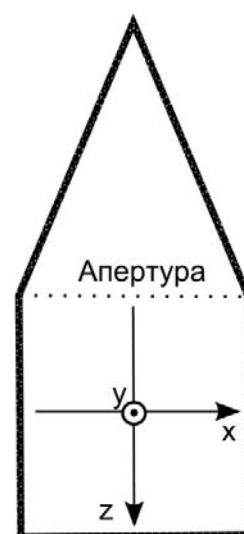
Задача построения двухпозиционной ЭПР вызывает интерес с теоретической [1] и практической [2, 3] точек зрения, особенно при измерениях в БЭК ЭПР объектов с большими размерами. Одним из путей решения такой задачи является измерение поля в ближней зоне исследуемого объекта при помощи сканера с последующим пересчетом поля в дальнюю зону.

В настоящей работе рассматривается задача построения двухпозиционных диаграмм ЭПР объектов методом математического моделирования на примере идеально проводящего цилиндра: ЭПР определяется по значениям электромагнитного поля на фрагменте цилиндрической поверхности в ближней зоне. Эта задача продиктована необходимостью измерения двухпозиционных диаграмм ЭПР в рупорной БЭК с линзовым коллиматором с использованием цилиндрического сканера.

Предполагается, что радиопоглощающий материал, покрывающий стенки камеры, идеален, то есть при решении задачи дифракции на цилиндре наличием стенок БЭК можно пренебречь. В качестве падающего поля используется два варианта электромагнитных полей: поле плоской волны (далее ЭМП-1), и поле (далее ЭМП-2), заданное плоской прямоугольной апертурой коллиматора в виде линзы, приближающее с заданной точностью плоскую волну (реальный случай) [3]. Апертура задаётся на входе в прямоугольную часть БЭК.

Выберем систему координат, изображенную на рисунке 1 (точка начала координат расположена в центре рабочей зоны БЭК). Рассматривались три варианта расположения металлического цилиндра:

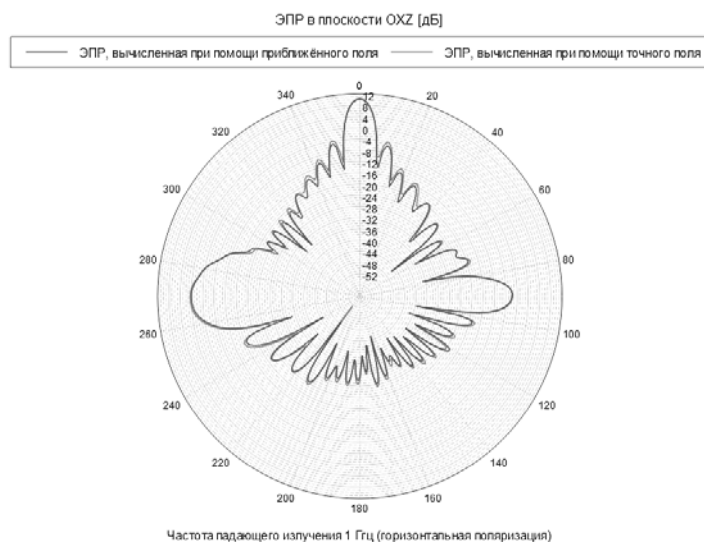
- (1) вертикально расположенный цилиндр (ось цилиндра совпадает с осью  $OY$ );
- (2) цилиндр, ось которого лежит в плоскости  $OYZ$  и составляет угол  $45$  градусов с осью  $OY$ ;
- (3) цилиндр, ось которого лежит в плоскости  $OXZ$  и составляет угол  $45$  градусов с осью  $OX$ ;



**Рис. 1.**  
Выбранная  
система  
координат в  
рупорной БЭК



Проводились сравнения диаграмм ЭПР, рассчитанных при использовании ЭМП-1 и ЭМП-2. На рис. 2 представлен пример графического сопоставления таких диаграмм ЭПР. Диаграммы, полученные при помощи ЭМП-2, демонстрируют неплохое согласие с диаграммами, полученными при помощи ЭМП-1.



**Рис. 2.** Сравнение диаграмм ЭПР, рассчитанных при использовании ЭМП-1 и ЭМП-2 для цилиндра, расположенного способом (3). Частота падающего излучения 1ГГц (горизонтальная поляризация). Направление обратного рассеяния – 180 градусов.

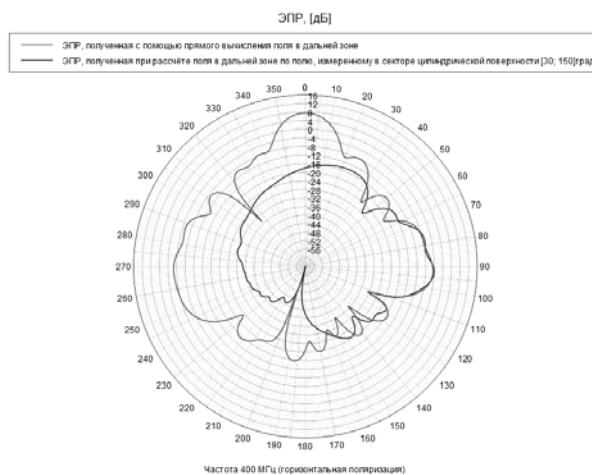
Следующим этапом работы было исследование возможности получения приближённых диаграмм рассеяния в заданном секторе углов приема при измерении поля не на всей цилиндрической поверхности (поверхности перемещения сканера в ближней зоне), а на её фрагменте (цилиндрической поверхности, заданной в секторе), для конфигураций (1) и (3). Сокращение площади измерения поля в ближней зоне позволит существенно сократить время, необходимое на измерения, в случаях, когда диаграмма ЭПР требуется лишь в небольших диапазонах изменения направлений на приёмную антенну. На рисунке 3 представлен пример сравнения диаграмм, получаемых при прямом вычислении и при пересчёте при помощи поля в ближней зоне, измеренного на фрагменте цилиндрической поверхности.

Результаты расчетов показывают, что полученные диаграммы ЭПР неплохо приближают искомые диаграммы. При этом оказалось, что отклонения значений полученных диаграмм от вычисленных напрямую значений зависят от размеров измеряемого сектора немонотонно. Поэтому

вопрос установления практического критерия близости получаемых диаграмм требует дальнейшего исследования.

Указанные вычисления и сравнения проведены для частот 1 ГГц, 800 МГц, 600 МГц и 400 МГц для случаев вертикальной и горизонтальной поляризации.

Все расчёты были произведены при помощи программного комплекса FEKO.



**Рис. 3.** Сравнение диаграмм ЭПР рассчитанных при использовании прямого вычисления поля в дальней зоне и поля в дальней зоне восстановленного при помощи измеренного поля на фрагменте цилиндрической поверхности в ближней зоне. Падающее поле задано апертурой. Цилиндр, расположен способом (3). Частота падающего излучения 400МГц (горизонтальная поляризация). Направление падения волны – 180 градусов.

Представленный пример расчета показывает возможность построения двухпозиционной ЭПР в секторе углов  $75^{\circ} - 115^{\circ}$  с погрешностью не более 2 дБ.

## ЛИТЕРАТУРА

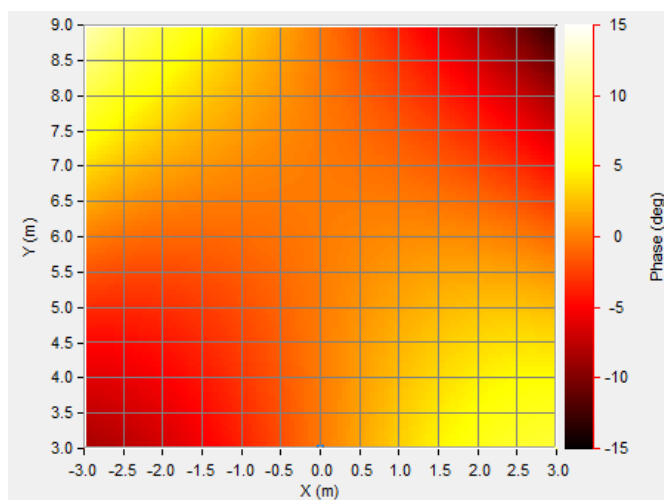
- [1] Kell R. E. On the derivation of bistatic RCS from monostatic measurements //Proceedings of the IEEE. – 1965. – Т. 53. – №. 8. – С. 983-988.
- [2] Балабуха Н.П., Солосин В.С., Зубов А.С. Компактные полигоны для измерения характеристик рассеяния. М., Наука, 2007.
- [3] Балабуха Н.П., Меньших Н.Л., Солосин В.С. Моделирование поля в рупорной безэховой камере с линзой. 58-я научная конференцию МФТИ (М.: 26 ноября 2015).

# РАСЧЕТ ПОЛЯ В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ КОМПАКТНОГО ПОЛИГОНА ПРИ ВЫНОСЕ ОБЛУЧАТЕЛЯ ИЗ ФОКУСА

А.С. Зубов, А.В. Никитенко

ИТПЭ РАН

Для определения механизма отражения у рассеивающих центров высокого порядка (переотражений, переизлученных поверхностных волн и т.п.) требуются измерения зависимости отраженного сигнала от частоты и угла поворота объекта при различных бистатических углах - углах между направлением облучения и приема [1]. В компактном полигоне изменение углов облучения и приема относительно оптической оси возможно путем выноса облучателей из фокуса. При этом возникают искажения амплитудно-фазового распределения (АФР) в рабочей зоне компактного полигона. Типичное фазовое распределение в центральном срезе рабочей зоны приведено на рис.1. Приемлемой неравномерностью является  $\pm 1$  дБ по амплитуде и  $\pm 15$  градусов по фазе. В работе получены зависимости размера рабочей зоны от бистатического угла для различных типов коллиматоров. Например, на частоте 6 ГГц при измерениях в компактном полигоне ИТПЭ РАН максимальный бистатический угол составляет 16 градусов для рабочей зоны 2 м и 9 градусов для рабочей зоны 3м. В работе рассмотрен метод увеличения размера рабочей зоны путем дополнительной обработки измерений, проведенных при различных положениях облучателя по высоте.



**Рис. 1.** Типичное распределение фазы в рабочей зоне при выносе облучателя из фокуса

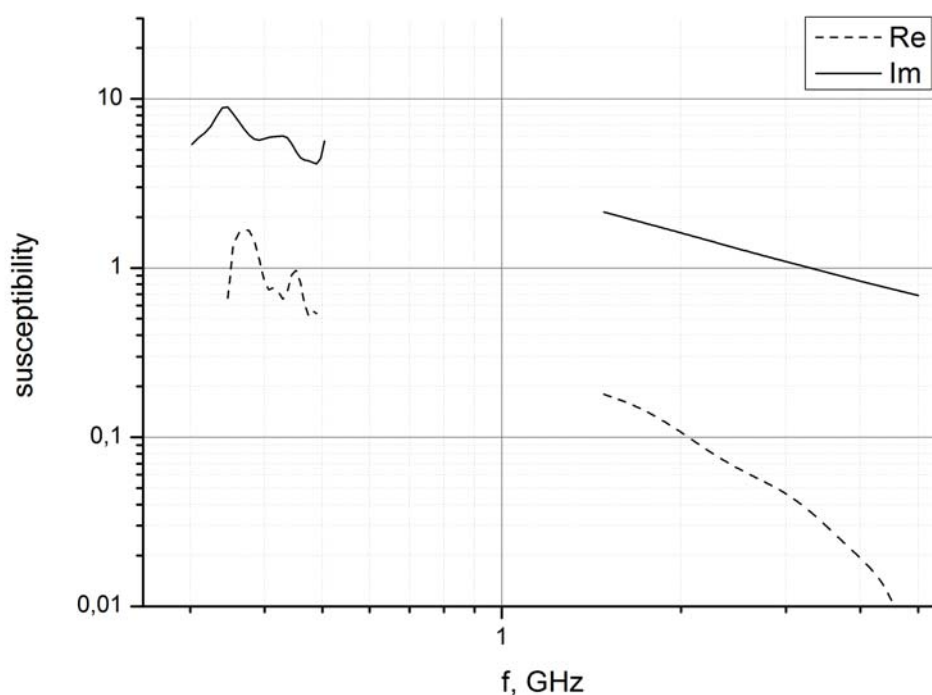
## ЛИТЕРАТУРА

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

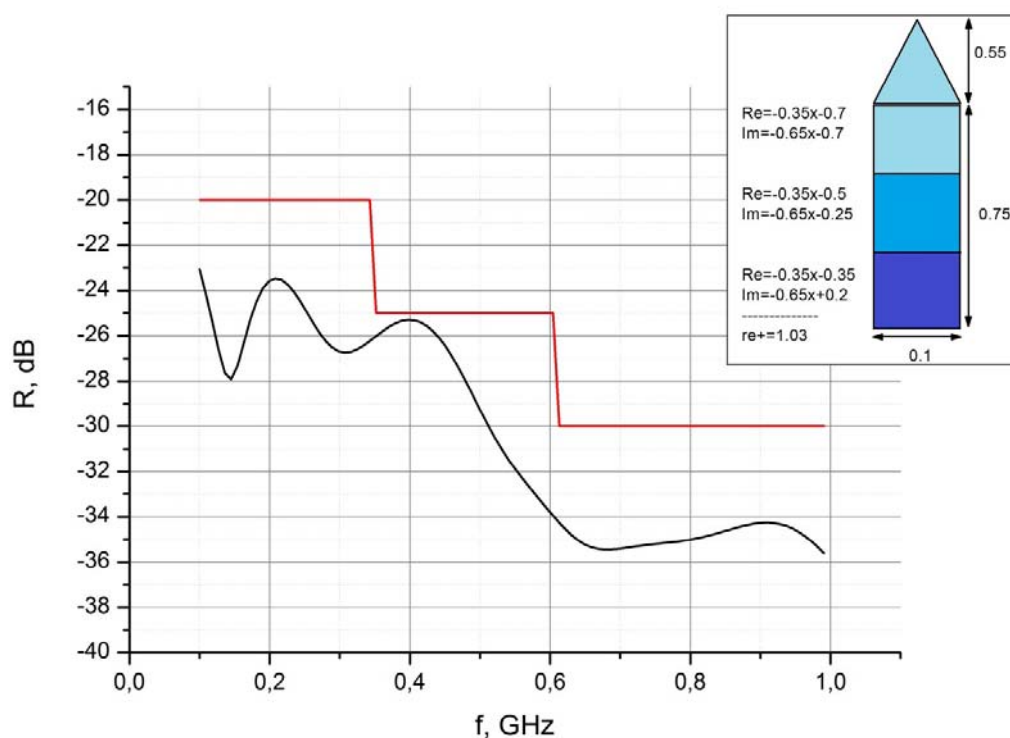
## РАЗРАБОТКА РПМ ДЛЯ ЧАСТОТ 100 МГц – 1 ГГц

А.В. Никитенко, А.С. Зубов, А.В. Осипов, С.Ю. Бобровский, В.А. Чистяев,  
А.Ю. Зарубина, А.А. Захаров  
ИТПЭ РАН

Основной целью работы было качественное решение задачи синтеза РПМ из поролона с углеродным наполнителем, с заданными отражательными характеристиками в диапазоне частот от 100 МГц до 1 ГГц. Форма материала представляет собой плоские слои с пирамидами наверху. Особенность задачи, во-первых, в минимизации высоты пирамид, а во-вторых, в возможности практической реализации такого материала средствами, доступными в ИТПЭ РАН. В работе представлены результаты измерений различных образцов поролона с углеродным наполнителем, изготовленных в ИТПЭ РАН (см. рис.1). Измерения проводились с целью подтверждения модели, предложенной в работе [1], в которой предлагается степенная зависимость восприимчивости от частоты.



**Рис. 1.** Измерения зависимости диэлектрической восприимчивости от частоты.



**Рис. 2.** Пример оптимизации РПМ. Ступенчатая функция – начальные требования к коэффициенту отражения R.

Был проведен поиск оптимального РПМ, соответствующего определенным требованиям по размерам и коэффициенту отражения (см. рис. 2), с использованием полученных значений для коэффициентов этих линейных зависимостей. Расчет проводился методами, описанными в работах [2 - 3], а именно, сначала приближенным методом из класса методов эквивалентной среды, а затем решение уточнялось точным методом связанных волн [3].

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] L. Liu, S.M. Matitsine, Y.B. Gan, L.F. Chen, L.B. Kong, K.N. Rozanov, Frequency dependence of effective permittivity of carbon nanotube composites, //J. Appl. Phys, 101, 09410, 2007.
- [2] А.В. Никитенко, А.С. Зубов, Н.Е. Шапкина. Моделирование электромагнитного рассеяния на радиопоглощающем материале методом связанных волн. //Математическое моделирование, 2014, том 26, номер 9, стр. 18-32.
- [3] А.В. Никитенко, А.С. Зубов, Е.В. Булычев. 3D моделирование электромагнитного рассеяния на рпм методом связанных волн. // Журнал Радиоэлектроники (электронный журнал), номер 12, 2014 год. <http://jre.cplire.ru/mac/dec14/15/text.html>

## ДВУХПОЗИЦИОННОЕ РАССЕЙЯНИЕ ТРЕУГОЛЬНИКОМ

А.М. Лебедев<sup>1</sup>, М.Л. Обухов<sup>2</sup>, И.А.Селин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИТПЭ РАН

<sup>2</sup>МФТИ (ГУ)

Металлический треугольник является одним из основных простых рассеивателей, закономерности двухпозиционного рассеяния которыми представляют интерес. В этом же ряду находится металлический стержень, рассеяние которым изучено в [1].

Пространственное распределение обратного и двухпозиционного рассеяния треугольником представимо в виде полярного распределения в сферических координатах, а также в виде поверхности либо линий уровня в угловых координатах азимута и зенита.

При представлении ЭПР в линейном масштабе отчётливо видны основные максимумы рассеяния. Для моностатической ЭПР это веера повышенного обратного рассеяния, перпендикулярные рёбрам треугольника. Нормаль к треугольнику перпендикулярна всем рёбрам одновременно, поэтому веера повышенного обратного рассеяния сходятся своими наиболее длинными частями к направлению зеркального обратного рассеяния от треугольника по нормали к его поверхности. Максимальное двухпозиционное рассеяние наблюдается в направлениях зеркально отражённого луча и теневого. Оба этих направления принадлежат одновременно всем трём конусам дифракционных лучей на рёбрах треугольника. Так, теневое направление является продолжением направления падения и образует со всеми рёбрами тот же угол, что и направление падения. Уровень двухпозиционной ЭПР на конусах дифракционных лучей повышается при подходе к зеркальному и теневому направлениям.

Представление двухпозиционной ЭПР треугольника в логарифмическом масштабе выявляет сложную систему максимумов рассеяния второго и третьего порядков малости. Основу распределения этих максимумов даёт интерференция между полями на конусах дифракционных лучей, соответствующих 1-му, 2-му и так далее боковым максимумам вокруг основных конусов дифракционных лучей.

Наблюдаются также конусы дифракционных лучей, связанные со встречным движением рёберных волн вдоль кромок треугольника и аналогичных рёберным волнам, бегущим по стержню.

Отметим, что для треугольника, находящегося над бесконечной идеально проводящей плоскостью, в области наблюдения, ограничиваемой теперь верхним полупространством, у двухпозиционного рассеяния наблюдаются два зеркальных максимума в результате падения реальной и

зеркальной волн на треугольник, и один теневой максимум в продолженном направлении подхода зеркальной падающей волны к треугольнику. Как следствие, число наблюдаемых конусов дифракционных лучей возрастает до шести. Поскольку незеркальный максимум обратного рассеяния наблюдается, когда направление облучения попадает на конус дифракционных лучей, то увеличению числа конусов дифракционных лучей соответствует увеличение числа максимумов ЭПР в азимутальных диаграммах обратного рассеяния. Отметим, что при приближении направления облучения к вертикальному это направление попадает на теневой лепесток, и обратное рассеяние треугольником существенно возрастает.

Для интерпретации вида распределений двухпозиционного рассеяния и прослеживания хода зеркально отражённых и дифракционных лучей использовалась геометрическая САПР Автокад.

## ЛИТЕРАТУРА

[1] *Елизаров С.В., Краснолобов И.И., Лебедев А.М., Семенов В.Н., Федоренко А.И., Фурманова Т.А.* Минимизация вклада в обратное рассеяние от поверхностных волн на тонком металлическом стержне путём нанесения радиопоглощающего покрытия на один из концов стержня // Международная научная конференция "Излучение и рассеяние электромагнитных волн ИРЭМВ-2013": труды конф., – Таганрог - Дивноморск, ЮФУ, 2013. С.329-333.

## УТОЧНЁННЫЕ ФОРМУЛЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ РАССЕЙЯНИЯ ЩЕЛЮЮ В ВИДЕ КАНАВКИ И СКВОЗНОГО ЗАЗОРА

А.М. Лебедев, И.И. Краснолобов, А.И. Федоренко, Т.А. Фурманова

ИТПЭ РАН

Решается задача оценки с единых позиций интенсивности рассеяния щелями в виде канавок и сквозных зазоров между металлическими листами. Полагается, что щель имеет прямоугольное поперечное сечение, а ширина  $W$  и глубина  $D$  щели много меньше длины волны. Оценивается наиболее интенсивное рассеяние на щелях, которое имеет место, когда и направление облучения, и направление наблюдения, и вектор электрического поля падающей волны принадлежат плоскости, перпендикулярной щели.

Рассматриваемые здесь узкие щели - необычные рассеиватели. Действительно, во-первых, двухпозиционная диаграмма рассеяния рассматриваемых щелей однородна по углу, что объясняется малостью ширины  $W$  по сравнению с длиной волны, и, во-вторых, интенсивность рассеяния не зависит от угла облучения. Следствием двух указанных свойств является однородность диаграммы обратного рассеяния по углу. Отметим также, что для сквозного зазора в листе идеального электрического проводника исчезающе малой толщины интенсивность двухпозиционного рассеяния одинакова по обе стороны листа. Однородность двухпозиционных и однопозиционных диаграмм, хотя и ограниченная (для поляризации, когда вектор электрического поля перпендикулярен щели) сближает щель с такими каноническими рассеивателями, как сфера и полость с хаотическим распространением электромагнитной волны внутри [1].

В работе раскрыты причины постоянства амплитуды двухпозиционного рассеяния щелью при вариации направления облучения. Во-первых, это постоянный для различных направлений облучения входной адмиттанс щели вследствие определённости физического процесса внутри щели. Действительно, в приближении основной моды внутреннее поле в щели формируется в результате встречного движения фрагментов плоских волн, соотношение амплитуд которых определяется только геометрией щели. Во-вторых, это постоянство входного воздействия в виде тангенциального ко входу щели магнитного поля падающей волны.

С использованием аппарата эквивалентных поверхностных токов во входной и выходной (при наличии) апертурах щели, получены простые формулы для оценки ЭПР канавки и зазора. Показано, что в случае канавки можно пренебрегать импедансом внешней области, примыкающей к щели, по сравнению с её входным импедансом. Однако в случае сквозного зазора такое пренебрежение импедансом внешней области приводит к



неправильным результатам. Импеданс внешней области определяется из численного решения задачи дифракции на щели определённой ширины  $W$ , и может быть далее перенесён на случаи рассеяния щелью любых типа и глубины  $D$ .

Из формул следуют следующие выводы, подтверждающиеся расчётом и экспериментом. Во-первых, ЭПР канавки пропорциональна  $W^2 \cdot D^2$ . Во-вторых, ЭПР сквозного зазора определяется фактором формы  $W/D$  и пропорциональна  $(W/D)$ .

## ЛИТЕРАТУРА

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

# КОРРЕКЦИЯ S-ПАРАМЕТРОВ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ МАТЕРИАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ В СВОБОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИАФРАГМЫ

А.А. Политико, К.М. Басков, В.Н. Семенов, В.А. Чистяев

ИТПЭ РАН

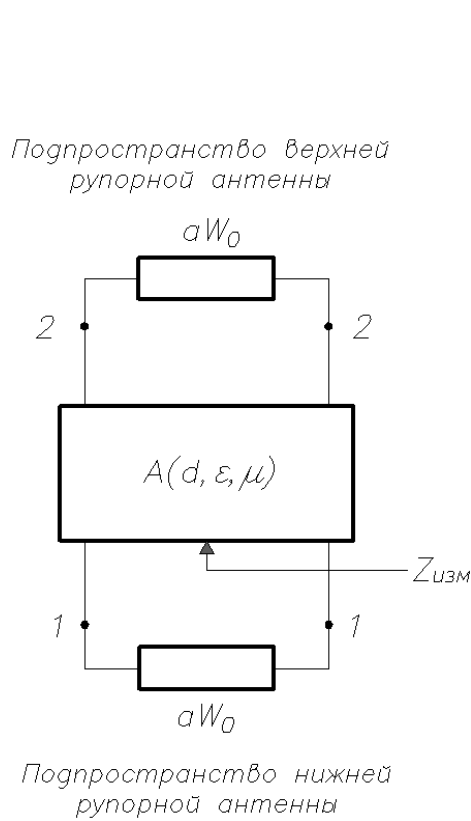
Разработана методика коррекции результатов измерений S-параметров, которая проводится при определении диэлектрической и магнитной проницаемости образцов материалов в сантиметровом диапазоне длин волн. Измерения параметров образцов материалов осуществляются в свободном пространстве с использованием диафрагмы на специализированном стенде, разработанном в ИТПЭ РАН. Коррекция необходима в случае, когда размер исследуемого образца имеет величину меньшую, чем две длины электромагнитной волны в свободном пространстве.

Предлагается алгоритм коррекции коэффициента отражения (параметра  $S_{11}$ ) и коэффициента прохождения (параметра  $S_{21}$ ), построенный на представлении измерительного комплекса в виде эквивалентной длинной линии (рис. 1). Дается математическое обоснование алгоритма коррекции в нестройной постановке. Делается предположение о том, что пространство измерительной установки имеет волновое сопротивление, которое отличается от волнового сопротивления свободного пространства в  $a$  раз. Исследуемый образец представляют в виде четырехполюсника с матрицей передачи  $A(d, \varepsilon, \mu)$  ( $d$  – толщина образца,  $\varepsilon$  и  $\mu$  – диэлектрическая и магнитная проницаемости образца соответственно). Приводится итерационный алгоритм определения диэлектрической и магнитной проницаемости по результатам скорректированных измерений S-параметров.

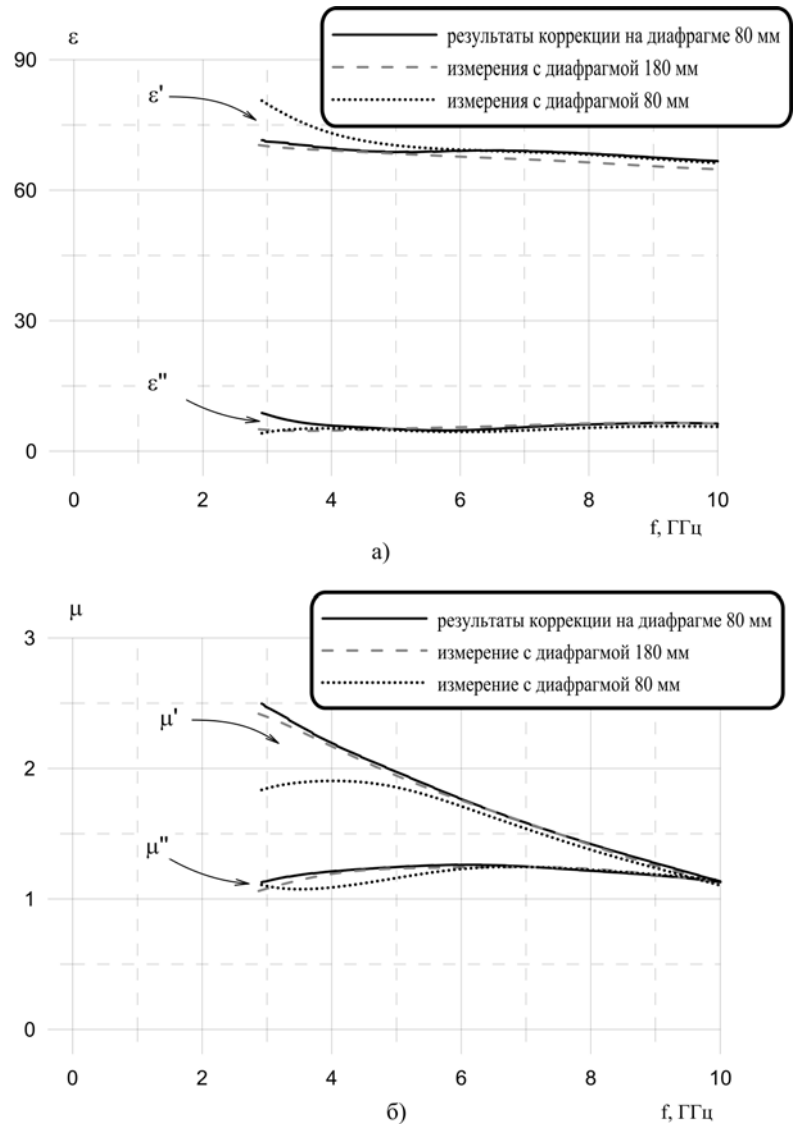
Проведена коррекция результатов измерений при определении электродинамических параметров материалов с использованием диафрагмы диаметром 80 мм, что составляет менее длины волны  $\lambda$  падающего электромагнитного излучения в низкочастотной области рассматриваемого диапазона (от 3 до 10 ГГц). На рис. 2 приведены сравнительные зависимости эффективных значений материальных параметров  $\varepsilon$  и  $\mu$  тестового образца в низкочастотной части диапазона до и после проведения коррекции результатов измерений. С целью оценки точности результатов после коррекции были дополнительно проведены измерения материальных параметров тех же самых образцов в частотном диапазоне от 1,5 до 24 ГГц, но с применением диафрагмы диаметром 180 мм. Размер диафрагмы в данном случае составляет порядка  $2\lambda$  и более. Это позволяет считать результаты измерений на частотах свыше 3 ГГц высокоточными, что

подтвердилось на этапе аттестации методики измерений ФГУП ВНИИФТРИ.

Коррекция результатов измерений S-параметров позволяет минимизировать ошибки при определении материальных параметров на частотах в окрестности 3-6 ГГц. Это существенно повышает достоверность расчетных оценок при проектировании многослойных радиопоглощающих покрытий.



**Рис. 1.** Эквивалентная длинная линия измерительной установки



**Рис. 2.** Частотная зависимость диэлектрической (а) и магнитной (б) проницаемости образца до и после проведения коррекции измерений

# ЭЛЕКТРОННЫЙ СПЕКТР И НАВЕДЁННЫЙ КОНДАКТАНС ГРАФЕНА И ВЕЙЛЕВСКОГО ПОЛУМЕТАЛЛА В ПОЛЕ СИЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ

К.И. Кугель<sup>1</sup>, Я.И. Родионов<sup>1</sup>, F.Nori<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ИТПЭ РАН

<sup>2</sup>Center for Emergent Matter Science, RIKEN, Saitama, Japan

Сверхрешетки на основе графена, графеновые нанополоски и другие мезоскопические структуры на основе графена привлекают в настоящее время значительный научный и практический интерес. Размерные эффекты в таких системах позволяют осуществлять тонкую настройку их электронного спектра и в результате контролировать их транспортные и оптические характеристики. Наиболее важное значение имеют периодические структуры, поскольку периодичность способствует появлению дополнительных особенностей в электронных спектрах таких, как появление щелей в спектре и новых точек Дирака. К сожалению, создание графеновых сверхрешеток оказывается весьма нелёгкой задачей, а возможности управления их свойствами – весьма ограниченными.

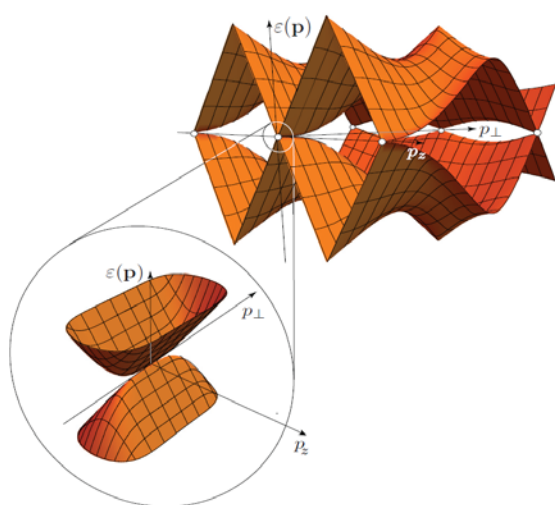
Однако, как хорошо известно из квантовой механики, имеется глубокая аналогия между эффектами, обусловленным пространственной и временной периодичностью. Действительно, аналог теоремы Блоха (теорема Флоке) также работает для систем, на которые действуют периодические во времени поля. В частности, роль энергии частицы играет квазиэнергия  $\varepsilon$ , ограниченная в пределах зоны Флоке  $-\hbar\omega_0/2 < \varepsilon < \hbar\omega_0/2$ , где  $\hbar$  – постоянная Планка, а  $\omega_0$  - характерная частота периодического во времени однородного поля. В спектре квазиэнергии могут появляться минищели, зависящие от амплитуды поля.

Понятие квазиэнергии широко используется во многих областях физики, в особенности на наноуровне. В последнее время особое внимание начали привлекать системы, описываемые гамильтонианом Дирака, помещённые в периодическое электромагнитное поле. В частности, концепция квазиэнергии была применена к графену взаимодействующему с электромагнитной волной. Однако большинство этих исследований касалось случая сравнительно слабых полей, когда хорошо работает теория возмущений. В то же время, эффекты, связанные с минищелями в спектре квазиэнергий должны проявляться ещё более ярко с увеличением амплитуды поля. Поэтому представляется важным провести исследование спектра в противоположном предельном случае большой амплитуды поля.

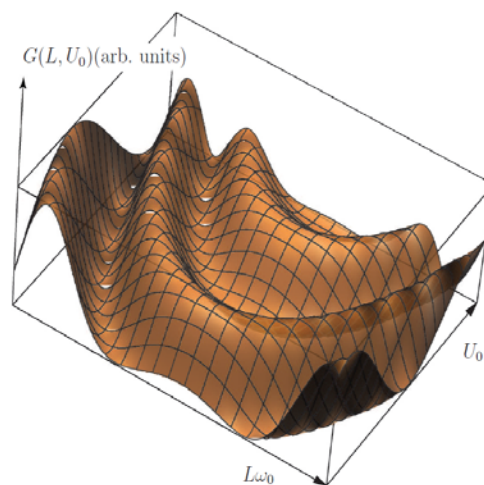
Графен, описываемый двухкомпонентной волновой функцией до некоторой степени аналогичен двухуровневой системе. Фактически, он

представляет собой хорошую реализацию интерферометра Ландау–Зинера, причём область применимости такой аналогии растёт с увеличением амплитуды поля. По сути дела, мы здесь имеем дело с интерференцией волновых функций, отвечающих многократным переходам между разными электронными состояниями.

В данной работе теоретически исследован наведённый кондактанс в дираковском материале (с двумерным или трёхмерным электронным спектром) в поле линейно поляризованной волны большой амплитуды. Показано, что кондактанс как функция амплитуды волны испытывает ярко выраженные осцилляции. Продемонстрировано, что в такой системе отчётливо проявляются эффекты, связанные с квантовой интерференцией Ландау–Зинера. Интерферометрия Ландау–Зинера ответственна за сильную перенормировку фермиевской скорости квазичастичных возбуждений, приводящую к её сильной анизотропии вблизи точек Дирака [1], и именно эта перенормировка вызывает осцилляторное поведение наведённого кондактанса. Продемонстрировано также, что помимо графена этот результат применим и к его трехмерному аналогу, а именно к вейлевскому полуметаллу [2].



**Рис. 1.** Спектр квазиэнергий вблизи точек Дирака. Ясно видна анизотропия спектра.



**Рис. 2.** Наведённый кондактанс как функция внешнего поля  $U_0$  и ширины образца  $L$ .

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] S.V. Syzranov, Ya.I. Rodionov, K.I. Kugel, F. Nori, Phys. Rev. B, vol. 88, 2013, id. 241112.  
 [2] Ya.I. Rodionov, K.I. Kugel, F. Nori, Phys. Rev. B, vol. 94, 2016, id. 195108.

## ЭФФЕКТЫ ЭЛЕКТРОН-ЭЛЕКТРОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ПОДКРУЧЕННОМ ДВУСЛОЙНОМ ГРАФЕНЕ

А.О. Сбойчаков<sup>1</sup>, А.Л. Рахманов<sup>1</sup>, А.В. Рожков<sup>1</sup>, Ф. Нори<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ИТПЭ РАН

<sup>2</sup>Center for Emergent Matter Science, RIKEN, Saitama, Japan

В подкрученном двухслойном графене кристаллические оси слоев не параллельны друг другу, а образуют некоторый угол  $\theta$ , который может существенно отличаться для различных образцов. Подкрутка слоев приводит к возникновению муарового узора и сверхструктуры, что в свою очередь влияет на электронные свойства двухслойки. Анализ в одноэлектронном приближении показывает [1], что можно выделить три области углов подкрутки с качественно различной низко-энергетической физикой. При больших углах ( $\theta > \sim 15^\circ$ ), спектр электронов на малых энергиях отличается от дираковского и может характеризоваться энергетической щелью, величина которой нетривиальным образом зависит от угла подкрутки [2,3]. При меньших углах щель оказывается малой, и электроны обладают дираковским спектром. Скорость Ферми, однако, монотонно уменьшается при уменьшении  $\theta$ . Наконец при  $\theta < \theta_c \sim 1-2^\circ$ , спектр на низких энергиях характеризуется плоскими зонами, а плотность состояний имеет пик на уровне Ферми.

Несмотря на прогресс в понимании электронных свойств подкрученного графена, многие вопросы остаются до сих пор не проработанными. Это касается прежде всего многочастичных эффектов, поскольку в подавляющем большинстве случаев теоретики ограничиваются одно-электронным приближением. В нашей работе мы рассматриваем эффекты электрон-электронного взаимодействия в пределе, как больших, так и малых углов. В первом случае, мы конструируем эффективный Гамильтониан системы, справедливый вблизи точки Дирака. На следующем шаге, мы учитываем кулоновское взаимодействие электронов. Расчет в приближении хаотических фаз приводит к перенормировке щели согласно формуле

$$\Delta \propto \Delta_0 \ln(E_\Lambda / \Delta_0),$$

где  $\Delta_0$  – затравочная щель, а  $E_\Lambda$  энергетический параметр, по порядку величины равный ширине зоны проводимости графена. Мы также исследуем возможность возникновения спонтанной экситонной щели, возникающей за счет кулоновского взаимодействия электронов. При малых углах подкрутки мы тестируем волну спиновой плотности в качестве основного состояния подкрученной двухслойки. Рассмотрение происходит в рамках многозонной модели Хаббарда (число зон равно удвоенному числу атомов в сверхячейке

~1000) в приближении среднего поля. Расчет производится численно на компьютере с 24х ядерным процессором, имеющемся в ИТПЭ РАН. Анализируется величина и пространственное распределение параметра порядка.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] A.V. Rozhkov, *et al.*, Phys. Rep. 648, 1 (2016).
- [2] A. O. Sboychakov, *et al.*, Phys. Rev. B 92, 075402 (2015).
- [3] A.V. Rozhkov *et al.*, Phys. Rev. B 95, 045119 (2017).

# СИСТЕМА СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ КУБИТОВ И РЕЗОНАТОРА: ИНДУЦИРОВАННАЯ ДИССИПАЦИЕЙ КВАНТОВАЯ ЗАПУТАННОСТЬ

В. В. Погосов<sup>1,2</sup>, С. В. Ремизов<sup>1</sup>, А. А. Жуков<sup>1</sup>, Д. С. Шапиро<sup>1</sup>,  
Ю. Е. Лозовик<sup>1,3</sup>

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

<sup>2</sup>ИТПЭ РАН

<sup>3</sup>Институт спектроскопии РАН

Рассмотрена динамика диссипативной системы кубитов и резонатора в режиме периодической модуляции энергии связи кубита и фотона, которую можно организовать в случае сверхпроводниковых потоковых кубитов за счет встраивания дополнительных СКВИДов в систему. Такая модуляция приводит к усилению процессов, не сохраняющих числа возбуждений в системе [1,2].

Выявлено очень богатое динамическое поведение данной гибридной системы. В частности, обнаружено, что диссипация энергии в одной из подсистем может усилить квантовые эффекты в другой подсистеме. Например, затухание в резонаторе помогает стабилизировать запутанность и квантовые корреляции между кубитами даже в стационарном состоянии и компенсировать конечную релаксацию кубита. Напротив, диссипация энергии в подсистеме кубитов приводит к усилению генерации фотонов из вакуума в режиме сильной модуляции, но разрушает как квантовую согласованность, так и квантовую взаимную информацию между кубитами.

Полученные результаты дают более глубокое понимание нестационарных эффектов квантовой электродинамики в полости в контексте обработки квантовой информации и могут иметь значение для квантовых технологий.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] A.A. Zhukov, D.S. Shapiro, W.V. Pogosov, Yu.E. Lozovik, Phys. Rev. A vol. 93, 2016, 063845.
- [2] A.A. Zhukov, D.S. Shapiro, S.V. Remizov, W.V. Pogosov, Yu. E. Lozovik, Phys. Lett. A vol. 381, 2017. P.592.



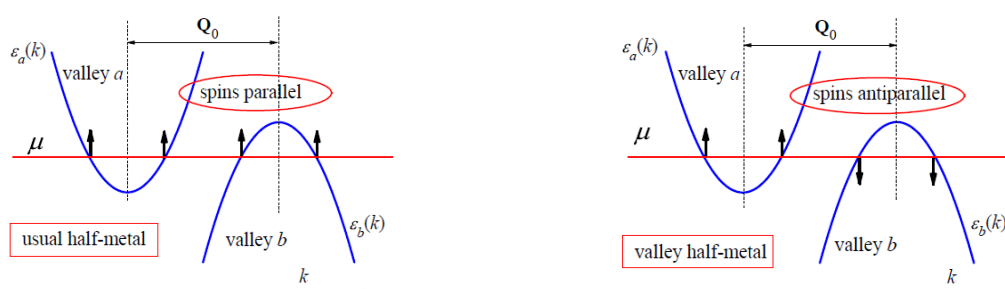
# НОВЫЙ ТИП ПОЛУМЕТАЛЛА, ВОЗНИКАЮЩИЙ В СИСТЕМАХ С НЕИДЕАЛЬНЫМ НЕСТИНГОМ

А.Л. Рахманов<sup>1</sup>, А.В. Рожков<sup>1</sup>, К.И. Кугель<sup>1</sup>, А.О. Сбойчаков<sup>1</sup>, F.Nori<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ИТПЭ РАН

<sup>2</sup>Center for Emergent Matter Science, RIKEN, Saitama, Japan

Полуметаллы (half-metals, не путать с semi-metals) являются перспективными материалами для спинтроники. В отличие от обычных металлов, у которых поверхность Ферми вырождена по отношению к проекции спина, у полуметаллов на Ферми поверхности присутствуют электроны только с одной проекцией спина. Весьма важной особенностью полуметаллов является полная спиновая поляризация электрического тока. Эксперимент показывает, что целый ряд материалов действительно являются полуметаллами (например, NiMnSb, La<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>MnO<sub>3</sub>, CrO<sub>2</sub>, Co<sub>2</sub>MnSi и другие). Обычно возникновение состояния полуметалла связывают с наличием сильных электрон-электронных корреляций. Мы предлагаем новый механизм возникновения полуметалла. Показано, что допирование изолятора с волной спиновой плотности (SDW) может стабилизировать новый тип полуметалла в системах со слабым взаимодействием.



**Рис. 1.** Схема электронных зон и спиновая поляризация в обычном и «долинном» (“valley”) полуметаллах

Пусть в недопированном состоянии имеются два листа Ферми-поверхности, обладающих полным нестингом и вырожденных по спину. Пусть один лист (или долина) электронный, а второй дырочный. SDW неустойчивость открывает щель в спектре электронов, переводя систему в диэлектрическое состояние. Отметим, что подобной электронной структурой обладают многие материалы, включая железосодержащие ВТСП, и другие важные материалы. Мы показали, что допирование такой системы переводит электроны в каждой долине в состояние полуметалла (Рис. 1). Если спиновая поляризация в обеих долинах параллельная, то мы имеем обычный полуметалл. Если же поляризация в долинах антипараллельна, то мы получаем новое состояние, которое мы назвали «долинным полуметаллом».

## НЕМОНОТОННОЕ МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЕ В *p-n*-ПЕРЕХОДАХ В ВЕЙЛЕВСКИХ ПОЛУМЕТАЛЛАХ

Я.И. Родионов<sup>3</sup>, Д.Р. Сайкин<sup>1</sup>, К.С. Тихонов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>МФТИ

<sup>2</sup>ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН

<sup>3</sup>ИТПЭ РАН

В настоящее время вейлевские полуметаллы (ВП) являются одними из наиболее интенсивно исследуемых соединений. Мы изучаем магнитокондуктанс  $G(H)$  *p-n*-перехода, выполненного на основе баллистического ВП с двумя конусами Дирака.

Мы показываем, что в отличие от одноконусного ВП, где туннелирование Клейна обеспечивает положительность дифференциального магнитосопротивления  $dG(H)/dH$ , физически реалистичная двуконусная модель приводит к немонотонному поведению  $G(H)$ . В результате межконусного туннелирования, индуцированного внешним полем, дифференциальный магнитокондуктанс интерполирует между положительными значениями (малые поля) и отрицательными (большие поля). Магнитокондуктанс выведен как функция внешнего магнитного поля и ориентации вектора импульса  $\mathbf{p}_0$ , соединяющего две точки Дирака, по отношению к вектору встроенного электрического поля  $\mathbf{E}$  *p-n*-перехода.

Аналитические результаты получены в приближении ВКБ, где произведение магнитной длины  $l_H$  и  $\mathbf{p}_0$ ,  $l_H |\mathbf{p}_0| \gg 1$  играет роль большого параметра в задаче. Эффект наиболее выражен, когда вектор  $\mathbf{H}$  перпендикулярен  $\mathbf{p}_0$  и гамильтониан системы суперсимметричен.

Обсуждаемый эффект вполне объясним уже из качественных соображений. В самом деле, полупроводники обладают отрицательным дифференциальным магнитокондуктансом, в то время, как клейновское туннелирование в ВП приводит к положительному магнитокондуктансу [1]. При достаточно большом внешнем магнитном поле частица может туннелировать между конусами ВП, из-за чего спектр последнего ведет себя как полупроводниковый.

Мы исходили из простейшей модели двуконусного ВП [2] (см. геометрию на рис.1):

$$\hat{H} = \begin{pmatrix} \hat{p}_z + V(z) & [1 - \hat{p}_x^2 - i(\hat{p}_y - Hx)] \\ [1 - \hat{p}_x^2 + i(\hat{p}_y - Hx)] & -\hat{p}_z + V(z) \end{pmatrix}$$

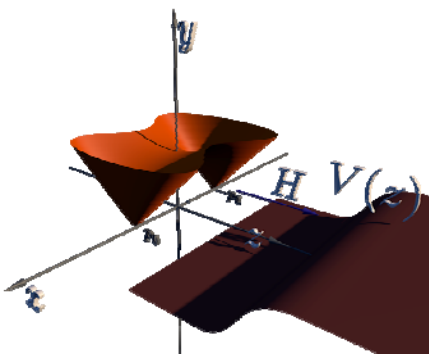
В результате для коэффициента прохождения *p-n*-перехода и кондуктанса получаем:

$$G(H) \sim T(H) = \frac{1}{1 + \exp\left(\sqrt{\pi} \frac{v_{\parallel} a}{v_{\perp} R_0} \frac{v_{\perp} p_0}{V_0} e^{-\frac{8R_0 p_0}{3\hbar}}\right)}$$

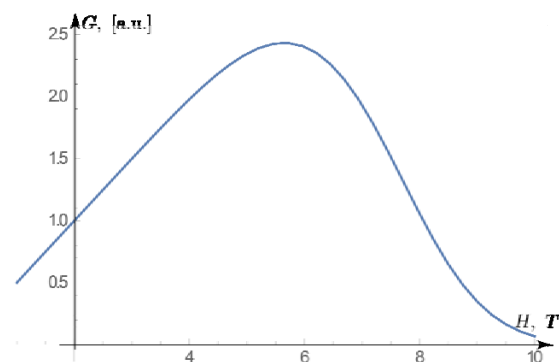
где

$$R_0 = \frac{p_0 v_{\parallel} c}{2v_{\perp} eH}.$$

График зависимости  $G(H)$  представлен на рис. 2.



**Рис.1.** Геометрия  $p$ - $n$ -перехода



**Рис.2.** Зависимость кондактанса от магнитного поля.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Songci Li, A.V. Andreev, B.Z. Spivak, Phys. Rev. B, vol. 94, 2016. Id. 081408(R).
- [2] Ryo Okugawa, Shuichi Murakami, Phys. Rev. B, vol. 89, (2014). Id. 235315.

**ДЛЯ ЗАМЕТОК**

## СОДЕРЖАНИЕ

1. **ОДНОФОТОННАЯ АПКОНВЕРСИЯ** В.Ю. Шишков, Е.С. Андрианов, А.А. Пухов, А.П. Виноградов, А.А. Лисянский, ФГУП ВНИИА им. Н.Л. Духова, МФТИ (ГУ), ИТПЭ РАН, Department of Physics, Queens College of the City University of New York, The Graduate Center of the City University of New York ..... 3
2. **ЭФФЕКТИВНОЕ ПОДАВЛЕНИЕ ШУМОВ В КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНЕЙ СИЛЫ** Н.Е. Нефедкин, Е.С. Андрианов, А.А. Пухов, А.П. Виноградов, ИТПЭ РАН, МФТИ (ГУ) ..... 4
3. **ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ СИЛЬНО ЛОКАЛИЗОВАННАЯ БЛОХОВСКАЯ ПЛАЗМОНАЯ МОДА НА ПЕРИОДИЧЕСКИ КОРРУГИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ СУБВОЛНОВЫХ МАСШТАБАХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ** Е.Д. Чубчев, И.А. Нечепуренко, А.П. Виноградов, ФГУП ВНИИА им. Н.Л. Духова, ИТПЭ РАН ..... 5
4. **ДИНАМИЧЕСКАЯ МАГНИТНАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ ГЕТЕРОГЕННЫХ НАНОСИСТЕМ НА ОСНОВЕ КОМПОЗИТОВ  $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$**  А.Б. Грановский, Ю.Е. Калинин, М.А. Каширин, В.В. Рыльков, К.Н. Розанов, А.В. Ситников, Е. Ганьшина, С.А. Вызулин, А.Н. Талденков, МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет, ИТПЭ РАН, ВГТУ, НИЦ «Курчатовский институт», Краснодарское высшее военное училище им. генерала армии С.М. Штеменко..... 6
5. **ИНВЕРСНЫЙ МАГНИТОКАЛОРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ И МАГНИТОСТРУКТУРНЫЙ МАРТЕНСИТНЫЙ ПЕРЕХОД В СПЛАВАХ ГЕЙСЛЕРА НА ОСНОВЕ Ni-Mn-In** А.Б. Грановский, И.Д. Родионов, М.И. Блинов, Ю.С. Кошкидько, В.Н. Прудников, М.Н. Прудникова, Е.А. Ганьшина, МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет, МЛСМПиНТ, Вроцлав, Польша, ИТПЭ РАН ..... 7
6. **ДЕТЕКЦИЯ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ ВИРУСОВ МЕТОДОМ ПОВЕРХНОСТНО-УСИЛЕННОГО КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЙАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕРЕБРЯНЫХ ПОДЛОЖЕК** Н.Н. Дурманов, И.А. Богинская, Р.Р. Гулиев, И.Н. Курочкин, И.А. Рыжиков, И.А. Родионов, А.С. Бабурин, ИБХФ РАН, ИТПЭ РАН, НОЦ «Функциональные микро/наносистемы» ..... 8
7. **ПРОФИЛИРОВАННЫЕ СЕРЕБРЯННЫЕ ПОДЛОЖКИ ДЛЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ МЕТОДОМ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЙАНИЯ** И.А. Богинская, К.Н. Афанасьев, А.С. Бабурин, И.Н. Курочкин, И.А. Рыжиков, И.А. Родионов, М.В. Седова, ИТПЭ РАН, НОЦ «Функциональные микро/наносистемы», МГУ им. М.В. Ломоносова, Химический факультет ..... 10

8. **ЛОКАЛИЗАЦИЯ СВЕТА В КОМПОЗИТНЫХ МЕТАЛЛО-ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МИКРОРЕЗОНАТОРАХ** А.В. Иванов, И.В. Быков, И.А. Богинская, И.А. Будашов, И.Н. Курочкин, А.Н. Лагарьков, И.А. Рыжиков, М.В. Седова, А.К. Сарычев, ИТПЭ РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова, Химический факультет, ИБХФ РАН ..... 12
9. **УСИЛЕНИЕ СИГНАЛА ГИГАНТСКОГО КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ НА ПОДЛОЖКАХ НА ОСНОВЕ ОДНОМЕРНЫХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ** Р.А. Сиразов, К.Н. Афанасьев, И.А. Богинская, И.А. Будашов, И.Н. Курочкин, А.В. Дорофеев, А.П. Виноградов, И.А. Рыжиков, ИТПЭ РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова, Химический факультет, МФТИ (ГУ) ..... 14
10. **МЕМРИСТИВНЫЕ СВОЙСТВА СТРУКТУР НА ОСНОВЕ НАНОКОМПОЗИТА  $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$**  В.В. Рыльков, А.В. Емельянов, В.А. Демин, С.Н. Николаев, К.Э. Никируй, В.А. Леванов, А.В. Ситников, Ю.Е. Калинин, ИТПЭ РАН, НИЦ «Курчатовский Институт», МФТИ (ГУ) ФНБИК, МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет, ВГТУ ..... 16
11. **ОСОБЕННОСТИ НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ НА НЕОДНОРОДНОСТЯХ СЛОИСТОЙ СИСТЕМЫ** Р.С. Пузько, Д.Н. Козлов, В.И. Фабелинский, А.К. Сарычев, К.Н. Афанасьев, И.А. Рыжиков, И.А. Богинская, М.В. Седова, А.М. Мерзликин, МФТИ (ГУ), ИОФ РАН, ИТПЭ РАН ..... 17
12. **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УЛЬТРАЗВУКА ПРИ ОСАЖДЕНИИ МИОГЛОБИНА ИЗ ВОДНОГО РАСТВОРА НА ГКР-АКТИВНЫЕ ПОДЛОЖКИ** Н.Д. Ушаков, И.А. Рыжиков, А.В. Зверев, И.А. Родионов, М.В. Седова, В.И. Полозов, И.А. Богинская, И.Н. Курочкин, ИТПЭ РАН, НОЦ «Функциональные микро/наносистемы», МФТИ (ГУ), МГУ им. М.В. Ломоносова, Химический факультет ..... 18
13. **МАГНИТООПТИЧЕСКИЙ БИОСЕНСОР НА ОСНОВЕ СЛОИСТОГО ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА** А.М. Мерзликин, Е.В. Кузнецов, А.Б. Грановский, ИТПЭ РАН, МФТИ (ГУ), МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет ..... 20
14. **САМОУСРЕДНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ В СЛОИСТОЙ СИСТЕМЕ** Р.С. Пузько, А.М. Мерзликин, МФТИ (ГУ), ИТПЭ РАН ..... 21
15. **КОНИЧЕСКАЯ РЕФРАКЦИЯ В МАГНИТООПТИЧЕСКОМ ДВУХОСНОМ КРИСТАЛЛЕ** Е.В. Кузнецов, А.М. Мерзликин, ИТПЭ РАН, МФТИ (ГУ) ... 22
16. **ПОДАВЛЕНИЕ ПЕРЕКРЕСТНОЙ СВЯЗИ В ПЛАЗМОННЫХ ВОЛНОВОДАХ** Е.В. Кузнецов, А.М. Мерзликин, А.А. Зябловский, А.П. Виноградов, А.А. Лисянский, ИТПЭ РАН, МФТИ (ГУ), Queens College of the CUNY, The Graduate Center of the CUNY ..... 23

17. ИЗМЕНЕНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ПЛЕНОК ФЕРРОМАГНИТНЫХ МЕТАЛЛОВ С РОСТОМ ТОЛЩИНЫ ПЛЕНКИ А.В. Осипов, С.Ю. Бобровский, П.А. Зезюлина, А.Н. Лагарьков, С.А. Маклаков, С.С. Маклаков, К.Н. Розанов, И.А. Рыжиков, И.Т. Якубов, ИТПЭ РАН .. 24
18. ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ЭФФЕКТИВНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ, СОДЕРЖАЩИХ ПОРОШКИ SiC А.Д. Мишин, К.Н. Розанов, С.Н. Старостенко, ИТПЭ РАН ..... 25
19. АГРЕГАЦИЯ ЧАСТИЦ ПРИ СИНТЕЗЕ ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКИ ПОРОШКОВ Fe@SiO<sub>2</sub> С.С. Маклаков, С.А. Маклаков, Д.А. Петров, К.Н. Розанов, И.А. Рыжиков, А.Ю. Зарубина, В.В. Бессалова, К.А. Талалаев, А.Н. Лагарьков, ИТПЭ РАН, МГУ имени М.В. Ломоносова, Химический факультет, МФТИ (ГУ) ..... 26
20. ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТНОЙ ЗАВИСИМОСТИ СВЧ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ВО ВНЕШНЕМ ПОСТОЯННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ А.О. Ширяев, С.Ю. Бобровский, А.В. Осипов, Д.А. Петров, К.Н. Розанов, С.Н. Старостенко, ИТПЭ РАН ..... 28
21. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПАРАФИНОВОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАТРИЦЫ ДЛЯ КОРРЕКТНОЙ ОЦЕНКИ ОБЪЁМНОГО НАПОЛНЕНИЯ Д.А. Петров, С.С. Маклаков, К.Н. Розанов, ИТПЭ РАН ..... 30
22. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВЧ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ МЕТАЛЛА ПО ИЗМЕРЕННЫМ ЧАСТОТНЫМ ЗАВИСИМОСТЯМ МАТЕРИАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОМПОЗИТОВ НА ПРИМЕРЕ КОМПОЗИТОВ С ПОРОШКАМИ СЕНДАСТА С.Н. Старостенко, К.Н. Розанов, А.О. Ширяев, А.Н. Лагарьков, А.Н. Шалыгин, ИТПЭ РАН, ИМЕТ РАН ... 31
23. МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ АППАРАТОВ КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ А.Е. Михайлицын, А.В. Гусев, К.А. Маилян, И.А. Рыжиков, ИТПЭ РАН ..... 34
24. ТОНКИЕ ПЛЁНКИ VO<sub>2</sub> НА ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ КОРУНДОВОЙ ПОДЛОЖКЕ В.И. Полозов, С.С. Маклаков, С.А. Маклаков, И.А. Рыжиков, М.В. Седова, А.Д. Мишин, С.Н. Старостенко, В.А. Амеличев, В.Н. Кисель, ИТПЭ РАН, МФТИ (ГУ), ЗАО «СуперОкс» . 36
25. ФОТОАКТИВНЫЕ НАНОКОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ФЕНИЛЗАМЕЩЁННОГО НАФТАЛОЦИАНИНА ЦИНКА И ПОЛИФЕНИЛЕНВИНИЛЕНА Е.Ф. Петрусевич, К.А. Талалаев, А.Е. Михайлицын, С.С. Маклаков, Т.В. Дубинина, ИТПЭ РАН, МФТИ (ГУ), МГУ имени М.В. Ломоносова, Химический факультет, ИФАВ РАН ... 38

26.	КОМПЕНСАЦИЯ ВЛИЯНИЯ ОБТЕКАТЕЛЯ ЛА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ФАР. МЕТОДЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НА АПЕРТУРЕ ФАР ПОД ОБТЕКАТЕЛЕМ В.И. Гриднев, НИИП им. В.В. Тихомирова .....	40
27.	КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ЭПР ТЕЛ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ НА ОСНОВЕ ФИЗИЧЕСКОЙ ОПТИКИ, ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ И МЕТОДА ИНТЕГРАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ В 2D-ПРОСТРАНСТВЕ В.В. Лесняк, ЦАГИ .....	43
28.	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ БИСТАТИЧЕСКИХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАЛОРАЗМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ <u>С.А. Федоров</u> , Н.Л. Меньших, Д.Е. Михель, ИТПЭ РАН, МФТИ (ГУ) .....	47
29.	ОСОБЕННОСТИ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ ОТ ВОЗДУХОЗАБОРНИКА С ПОКРЫТИЯМИ В.Н. Кисель, ИТПЭ РАН .....	48
30.	РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЯ В РУПОРНОЙ КАМЕРЕ С ЛИНЗОЙ С ОПТИМИЗИРОВАННЫМ ПРОСВЕТЛЯЮЩИМ СЛОЕМ <u>Н.Л. Меньших</u> , Н.П. Балабуха, В.С. Солосин, ИТПЭ РАН. МФТИ (ГУ) .....	50
31.	РЕЗУЛЬТАТЫ НАСТРОЙКИ И ИСПЫТАНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОМПАКТНОГО ПОЛИГОНА <u>В.С. Солосин</u> , Н.П. Балабуха, А.С. Зубов, С.А. Федоров, В.Е. Яковлев, ИТПЭ РАН ...	52
32.	ПРОГРАММА ДЛЯ ЮСТИРОВКИ ЗЕРКАЛА КОЛЛИМАТОРА С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО ТРЕКЕРА С.А. Федоров, ИТПЭ РАН .....	54
33.	МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ ДВУХПОЗИЦИОННОЙ ЭПР КРУГОВОГО ЦИЛИНДРА В РУПОРНОЙ БЭК С КОЛЛИМАТОРОМ <u>Д.А. Коняев</u> , Н.П. Балабуха, Н.Л. Меньших, Н.Е. Шапкина, ИТПЭ РАН .....	56
34.	РАСЧЕТ ПОЛЯ В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ КОМПАКТНОГО ПОЛИГОНА ПРИ ВЫНОСЕ ОБЛУЧАТЕЛЯ ИЗ ФОКУСА <u>А.С. Зубов</u> , А.В. Никитенко, ИТПЭ РАН .....	59
35.	РАЗРАБОТКА РПМ ДЛЯ ЧАСТОТ 100 МГц – 1 ГГц <u>А.В. Никитенко</u> , А.С. Зубов, А.В. Осипов, С.Ю. Бобровский, В.А. Чистяев, А.Ю. Зарубина, А.А. Захаров, ИТПЭ РАН .....	60
36.	ДВУХПОЗИЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ ТРЕУГОЛЬНИКОМ <u>А.М. Лебедев</u> , М.Л. Обухов, И.А. Селин, ИТПЭ РАН, МФТИ (ГУ) .....	60
37.	УТОЧНЁННЫЕ ФОРМУЛЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ РАССЕЯНИЯ ЩЕЛЬЮ В ВИДЕ КАНАВКИ И СКВОЗНОГО ЗАЗОРА <u>А.М. Лебедев</u> , И.И. Краснолобов, А.И. Федоренко, Т.А. Фурманова, ИТПЭ РАН .....	64



38.	<b>КОРРЕКЦИЯ S-ПАРАМЕТРОВ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ МАТЕРИАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ В СВОБОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИАФРАГМЫ</b> <b><u>А.А. Политико</u>, К.М. Басков, В.Н. Семенов, В.А. Чистяев, ИТПЭ РАН</b> .....	66
39.	<b>ЭЛЕКТРОННЫЙ СПЕКТР И НАВЕДЁННЫЙ КОНДАКТАНС ГРАФЕНА И ВЕЙЛЕВСКОГО ПОЛУМЕТАЛЛА В ПОЛЕ СИЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ</b> <b><u>К.И. Кугель</u>, Я.И. Родионов, F.Nori, ИТПЭ РАН, Center for Emergent Matter Science, RIKEN, Saitama, Japan ...</b>	68
40.	<b>ЭФФЕКТЫ ЭЛЕКТРОН-ЭЛЕКТРОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ПОДКРУЧЕННОМ ДВУСЛОЙНОМ ГРАФЕНЕ</b> <b><u>А.О. Сбойчаков</u>, А.Л. Рахманов, А.В. Рожков, F.Nori, ИТПЭ РАН, Center for Emergent Matter Science, RIKEN, Saitama, Japan</b> .....	70
41.	<b>СИСТЕМА СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ КУБИТОВ И РЕЗОНАТОРА: ИНДУЦИРОВАННАЯ ДИССИПАЦИЕЙ КВАНТОВАЯ ЗАПУТАННОСТЬ</b> <b><u>В.В. Погосов</u>, С.В. Ремизов, А.А. Жуков, Д.С. Шапиро, Ю.Е. Лозовик, ФГУП ВНИИА им. Н.Л. Духова, ИТПЭ РАН, Институт спектроскопии РАН</b>	72
42.	<b>НОВЫЙ ТИП ПОЛУМЕТАЛЛА, ВОЗНИКАЮЩИЙ В СИСТЕМАХ С НЕИДЕАЛЬНЫМ НЕСТИНГОМ</b> <b><u>А.Л. Рахманов</u>, А.В. Рожков, К.И. Кугель, А.О. Сбойчаков, F. Nori, ИТПЭ РАН, Center for Emergent Matter Science, RIKEN, Saitama, Japan</b> .....	73
43.	<b>НЕМОНОТОННОЕ МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЕ В <i>p-n</i>-ПЕРЕХОДАХ В ВЕЙЛЕВСКИХ ПОЛУМЕТАЛЛАХ</b> <b><u>Я.И. Родионов</u>, Д.Р. Сайкин, К.С. Тихонов, МФТИ (ГУ), ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН, ИТПЭ РАН</b> .....	74

**ВОСЕМНАДЦАТАЯ ЕЖЕГОДНАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
ИТПЭ РАН**

Сборник тезисов докладов

---

Подписано в печать 04.17		Формат 60x84/16
Печать офсетная	Уч.-изд.л. 2,25	Усл.-печ.л 2,09
Тираж 100 экз.	Заказ № 83	

---

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