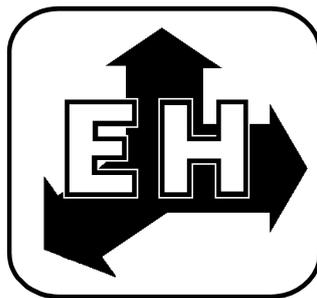


**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ПРИКЛАДНОЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИТПЭ РАН)**



**ДЕВЯТНАДЦАТАЯ ЕЖЕГОДНАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ИТПЭ РАН**

(Москва – 14 - 18 мая 2018 г.)

Сборник тезисов докладов

ДЕВЯТНАДЦАТАЯ ЕЖЕГОДНАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ИТПЭ РАН

Сборник тезисов докладов.

Под редакцией к.ф.-м.н. К.Н. Розанова – М.: ИТПЭ РАН. 2018. 82 с.

Сборник содержит тезисы докладов, представленных на Девятнадцатой ежегодной научной конференции ИТПЭ РАН. Конференция посвящена обзору научных разработок и практических приложений, осуществленных в Институте теоретической и прикладной электродинамики РАН 2017 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

ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ УСИЛЕНИЕ SERS ФОНОНАМИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛАЗМОННЫХ СТРУКТУР

В.Ю. Шишков^{1,2,3}, Е.С. Андрианов^{2,3}, А.А. Пухов^{1,2,3}, А.П. Виноградов^{1,2,3}

¹ИТПЭ РАН

²МФТИ (ГУ)

³ФГУП ВНИИА им. Н.Л. Духова

Рамановское рассеяние представляет собой неупругий процесс рассеяния фотона на молекуле или группе молекул, при котором рассеянный фотон испытывает частотный сдвиг. Этот частотный сдвиг несёт в себе информацию о колебательной структуре молекулы. В 1974 году впервые было обнаружено резкое увеличение сигнала от рамановского рассеяния на молекулах, находящихся вблизи металлической поверхности [1]. Этот эффект был подтверждён в 1977 году в работе [2]. Основанная на этом эффекте спектроскопия (SERS) применяется сегодня в материаловедении, нанотехнологиях, химии и биологии [3].

В настоящей работе показано, что SERS может быть усилен при помощи модуляции константы взаимодействия между плазмоном и колебательными степенями свободы молекулы. Такая модуляция может быть обеспечена возбуждением фононов плазмонной структуры. Показано, что если частота модуляции находится вблизи частоты колебаний молекулы, то при глубине модуляции всего несколько процентов можно получить эффект усиления как стоксовского, так и антистоксовского сигналов на порядок. Данный эффект открывает возможность усиления SERS за счет возбуждения фононов в плазмонной структуре.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *M. Fleischmann et. al.*, Chemical Physics Letters, 26, 163-166 (1974).
- [2] *D. L. Jeanmaire et. al.*, Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry 84, 1-20 (1977).
- [3] *X. M. Qian, S. M. Nie*, Chemical Society Reviews 37, 912-920 (2008).

**ВЛИЯНИЕ КОНЕЧНОГО РАЗМЕРА ПЛАЗМОННЫХ НАНОЧАСТИЦ,
ОБРАЗУЮЩИХ ПЕРИОДИЧЕСКУЮ ЦЕПОЧКУ, НА СВОЙСТВА
РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ ПО НЕЙ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПЛАЗМОНОВ**

Е.Д. Чубчев¹, А.В. Дорофеенко², А.П. Виноградов²

¹ФГУП ВНИИА им. Н.Л. Духова

²ИТПЭ РАН

В работах [1, 2] было показано, что поверхностные плазмоны в цепочках металлических наносфероидов, размеры и расстояние между которыми составляют несколько десятков нанометров, могут иметь поперечную локализацию, совпадающую по порядку величины с расстоянием между сфероидами. При этом длина пробега оказывается макроскопической величиной и составляет около 15 мкм. Однако для расчётов использовалось приближение точечных диполей, применимость которого сомнительна при расстояниях между наночастицами, сравнимых с их размерами.

В данной работе мы исследуем распространение поверхностных плазмонов по цепочке металлических наносфероидов с учётом их размеров. Мы показали, что учёт конечного размера сфероидов приводит к значительному изменению передающих характеристик цепочки сфероидов, в частности, резко уменьшается длина пробега плазмона.

ЛИТЕРАТУРА

[1] A. A. Goyadinov *et. al.*, Phys. Rev. B 78, 035403 (2008).

[2] I. L. Rasskazov *et. al.*, Opt. Lett. 38, 4743-4746 (2013).

ЯВЛЯЕТСЯ ЛИ ОДНОПРОХОДНЫЙ ЛАЗЕР НАСТОЯЩИМ ЛАЗЕРОМ?

И.В. Доронин^{1,2}, Е.С. Андрианов^{1,2}, А.А. Зябловский^{1,2}, А.А. Пухов^{1,2,3},
Ю.Е. Лозовик^{1,2,4}, А.А. Лисянский⁵, А.П. Виноградов^{1,2,3}

¹ФГУП ВНИИА им. Н.Л. Духова

²МФТИ (ГУ)

³ИТПЭ РАН

⁴CUNY

Методами численного моделирования исследована когерентность второго порядка усиленного спонтанного излучения, испускаемого однопроходным лазером. А именно, получена зависимость автокорреляционной функции второго порядка в нуле,

$$g^{(2)}(0) = \frac{\langle I^2 \rangle}{\langle I \rangle^2},$$

от накачки. Физический смысл этой функции – относительная величина флуктуаций выходного излучения.

В качестве модели такого устройства использован одномерный нанопровод, заполненный накачиваемыми квантовыми точками (КТ). Поведение системы смоделировано системой уравнений Максвелл-Блоха с шумом [1].

Получено, что $g^{(2)}(0)$ для усиленного спонтанного излучения равна 1.6 (Рис.1), в то время как известно, что у когерентного лазерного излучения $g^{(2)}(0)=1$, следовательно, усиленное спонтанное излучение некогерентно, несмотря на сужение линии излучения с ростом накачки (Рис.2).

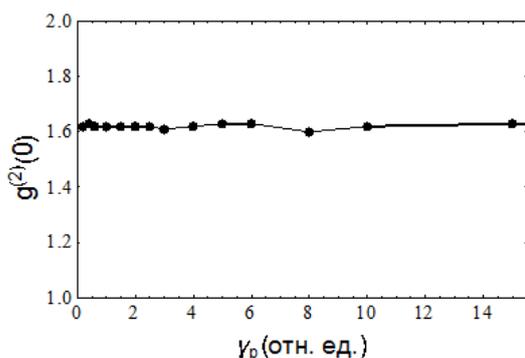


Рис. 1. Функция когерентности второго порядка для усиленного спонтанного излучения однопроходного лазера.

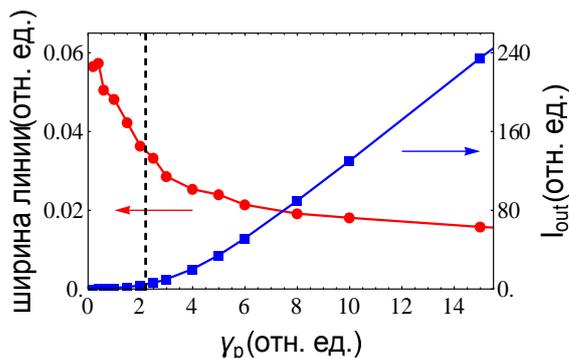


Рис. 2. Кривая генерации и ширина линии в зависимости от накачки для однопроходного лазера.

ЛИТЕРАТУРА

[1] M.O. Scully. Quantum optics. Cambridge university press, 1997.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОГЕРЕНТНОСТИ ВТОРОГО ПОРЯДКА ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМОННОГО РЕЗОНАТОРА, ВОЗБУЖДАЕМОГО N-V ЦЕНТРОМ

Н.Е. Нефедкин^{1,2,3}, Е.С. Андрианов^{2,3}, А.А. Зябловский^{2,3},

А.А. Пухов^{1,2,3}, А.П. Виноградов^{1,2,3}

¹ИТПЭ РАН

²МФТИ (ГУ)

³ФГУП ВНИИА им. Н.Л. Духова

Дефект кристаллической решётки алмаза называют N-V центром, если он включает в себя одну вакансию решётки со связанным с ней атомом азота. Важной особенностью N-V центра является то, что его свойства практически аналогичны свойствам атома [1] и могут управляться с помощью электромагнитных полей. В настоящее время интерес к изучению N-V центров тесно связан с возможным их использованием в качестве базового логического элемента квантового процессора [2].

В настоящей работе исследуется функция когерентности второго порядка электромагнитного поля, излучаемого плазмонным нанорезонатором, который возбуждается N-V центром. Известно, что у N-V центра, как у источника одиночных фотонов, функция когерентности второго порядка, $g^{(2)}(0)$, равняется 0, в то время как у плазмонной моды в состоянии теплового равновесия $g^{(2)}(0)$ достигает 2. Однако статистические свойства излучения всей системы неизвестны. В настоящей работе исследуется динамика данной системы. Основой описания является управляющее уравнение в форме Линдблада, описывающее динамику плазмонных мод металлической наноструктуры, взаимодействующих с дипольным моментом N-V центра. Показано, что функция когерентности существенно зависит от отношения константы взаимодействия моды и N-V центра к температуре резервуара излучения. Установлено, что $g^{(2)}(0)$ принимает значения в интервале от 0 до 2. Этот факт может получить применение в метрологических приложениях [3].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Kurtsiefer C., et al.*, Phys. Rev. Lett., vol. 85, 2000. P.290.
- [2] *Neumann P., et al.*, Science, vol. 320, 2008. P. 1326-1329.
- [3] *Degen C., Reinhard F., Cappellaro P.*, Rev. Mod. Phys., vol. 89, 2017. P.035002.

**ФОРМИРОВАНИЕ СУБИЗЛУЧАЮЩЕГО СОСТОЯНИЯ АТОМОВ
ПРИ ИХ БЛИЖНЕПОЛЬНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ**

**В.Ю. Шишков^{1,2}, А.А. Зябловский³, Е.С. Андрианов^{1,2,3},
А.А. Пухов^{1,2}, А.П. Виноградов^{1,2}**

¹ИТПЭ РАН

²МФТИ (ГУ)

³ФГУП ВНИИА им. Н.Л. Духова

Микроскопические квантовые объекты, такие как атомы, молекулы, квантовые точки и кубиты активно исследуются в последнее время. Интерес к ним связан, прежде всего, с их неклассическим поведением [1], которое может быть использовано во многих областях, начиная от создания усиливающих сред и заканчивая квантовыми компьютерами.

Важными для исследователей обычно являются либо квантовая эволюция атомов, либо свойства излучения, которое они испускают. Однако, взаимодействие между атомами происходит не только посредством испускаемых ими фотонов, но и посредством ближних полей. В докладе показано, что ближнеполюное взаимодействие атомов может приводить к формированию субизлучающего состояния, которое препятствует испусканию фотонов и уменьшает величину радиационных потерь в системе.

ЛИТЕРАТУРА

[1] *J. A. Mlynek et. al.*, Nat. Commun 5, 5186 (2014).

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ ГОЛОГРАФИИ
В СОЗДАНИИ СТРУКТУРЫ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ
ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН**

А.М. Мерзликин¹, А.И. Игнатов²

¹ИТПЭ РАН

²ФГУП ВНИИА им. Н.Л. Духова

Оптические поверхностные волны находят широкое применение в рамановской спектроскопии, оптических химических и биологических сенсорах, оптических межсоединениях и модуляторах. Для возбуждения таких волн падающим лазерным излучением часто используются дифракционные решетки на поверхности, вдоль которой распространяется поверхностная волна. Однако эффективность возбуждения поверхностной волны решетками зачастую невелика, особенно при размере решетки всего лишь в несколько периодов.

Для повышения эффективности возбуждения поверхностной волны предложен метод, основанный на принципе голографии. В качестве примера рассмотрено возбуждение плазмонной волны в диэлектрическом слое на поверхности металла. Приведено сравнение эффективности возбуждения данной плазмонной волны с помощью предлагаемых объемных голограмм в диэлектрическом слое с эффективностью возбуждения с помощью оптимизированных периодических решеток в диэлектрическом слое (см. Рис. 1). Найдены условия, при которых голограммы являются существенно более эффективными, чем периодические решетки. Также предложены и проанализированы голограммы, записываемые в две и более итераций. Данные голограммы являются значительно более эффективными, чем оптимизированные периодические решетки при всех углах падения возбуждающего Гауссова пучка [1-3].

Предложенный метод может быть обобщен для эффективного возбуждения различных типов оптических поверхностных волн и мод оптических волноводов с диэлектрическими компонентами.

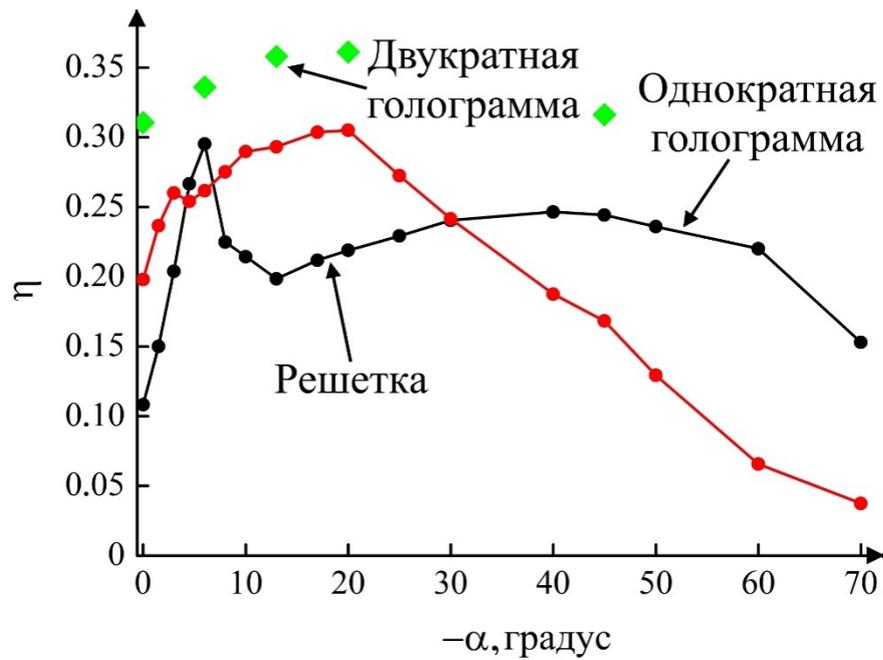


Рис. 1. Зависимость эффективности решетки и одно- и двух-кратной голограмм от угла падения.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] A.I. Ignatov, A.M. Merzlikin. Proc. SPIE Optics&Photonics, 2017, P. 1034625.
- [2] A.I. Ignatov, A.M. Merzlikin. JOSA B, vol. 35, 2018, P.308.
- [3] A.I. Ignatov, A.M. Merzlikin. Opt. Comm., vol. 410, 2018, P. 83.

ЛОКАЛИЗАЦИЯ СВЕТА В МЕТАМАТЕРИАЛАХ НА ОСНОВЕ ПЕРИОДИЧЕСКИХ МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МИКРОРЕЗОНАТОРОВ

К.Н. Афанасьев¹, И.В. Быков¹, И.А. Богинская¹, А.В. Иванов¹,
И.Н. Курочкин^{2,3}, А.Н. Лагарьков¹, А.М. Мерзликин¹, В.В. Михеев⁴,
Д.В. Негров⁴, И.А. Рыжиков¹, М.В. Седова¹, А.К. Сарычев¹

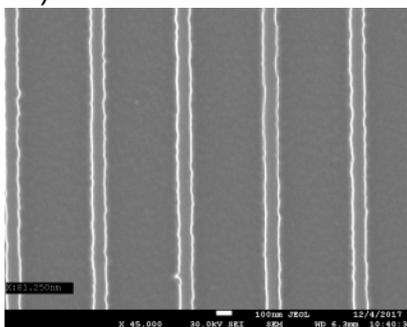
¹ИТПЭ РАН

²МГУ им. М.В. Ломоносова, Химический факультет

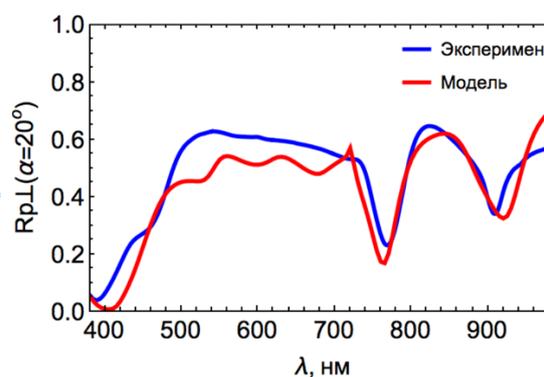
³ИБХФ РАН

⁴МФТИ (ГУ)

Проведена работа по разработке, изготовлению, и изучению оптических свойств новых метаматериалов - резонаторных кремниевых структур в виде гребней, на поверхность которых нанесен нанослой серебра (Рис.1а).



(а)



(б)

Рис.1. (а) Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ). Периодическая система кремниевых гребней. Параметры: период 561 нм, высота 80 нм, поверхностный слой серебра составляет 20 нм. (б) Коэффициент отражения от структуры для угла падения 20° . Плоскость падения и вектор напряженности электрического поля перпендикулярны гребням.

Метаматериалы были изготовлены из кремния Si (100) методом электронно-лучевой литографии (Crestec КАБЕ 9000С) с последующим плазменно-химическим травлением кремния (CORIAL 200I) и напылением нанослоя серебра толщиной 20 нм.

Проведено компьютерное моделирование новых резонаторных структур, подобраны химический состав и геометрические параметры для генерации колоссальных локальных полей на поверхности метаматериала. Проведены работы по измерению коэффициента отражения от такой структуры при отсутствии и наличии поверхностного слоя серебра. Результаты расчетов и экспериментов продемонстрировали аномалии Вуда в коэффициенте отражения, зависящие от угла падения и связанные с

возбуждением поверхностных волн в метаматериале посредством дифракции падающего света (Рис.1(б)). Помимо резонансов, связанных с аномалиями Вуда и определяемых периодом дифракционной решетки, в метаматериале, покрытом слоем серебра, возбуждаются и резонансы типа Фабри-Перо, локализованные в области гребней. Показано, что добротностью, а также положением таких резонансов можно управлять, изменяя режим напыления серебра на поверхность метаматериала. Проведены экспериментальные работы по регистрации сигнала комбинационного рассеяния (КР) света от модельного аналита – 5,5-дитио-бис(2-нитробензойной кислоты) (ДТНБ). Результаты продемонстрировали относительное усиление сигнала КР от ДТНБ на характерных стоксовых частотах в структурированных областях метаматериала – на несколько порядков величины. Подход, предложенный в работе, который заключается в создании регулярно профилированных металлодиэлектрических резонаторных структур, представляет практический интерес для разработки новых биосенсорных систем [1,2].

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-08-01448, программы Президиума РАН № 56 «Фундаментальные основы прорывных технологий в интересах национальной безопасности».

ЛИТЕРАТУРА

- [1] A.K. Sarychev, A. Lagarkov, A. Ivanov, I. Boginskaya, I. Bykov, I. Ryzhikov, M. Sedova, A. Vaskin, I. Kurochkin, I. Rodionov, D. Negrov, Metal-dielectric resonances in tip silicon metasurface and SERS based nanosensors, Proc. of SPIE Vol. 10346, 103460 (2017).
- [2] A. Lagarkov, I. Boginskaya, I. Bykov, I. Budashov, A. Ivanov, I. Kurochkin, I. Ryzhikov, I. Rodionov, M. Sedova, A. Zverev, A.K. Sarychev, Light localization and SERS in tip-shaped silicon metasurface, Opt. Express Vol. 25, No. 15, 17021-17038 (2017).

НОВЫЙ ГКР СЕНСОР: УСИЛЕНИЕ СИГНАЛА КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЙЯНИЯ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ

А.В. Елецкий², А.К. Сарычев¹, И.А. Богинская¹, Г.С. Бочаров²,
Н.А. Высочанский³, М.С. Егин², А.В. Иванов¹, И.Н. Курочкин⁴,
И.А. Рыжиков¹, Г.Е. Федоров⁵

¹ИТПЭ РАН

²Национальный исследовательский Университет МЭИ

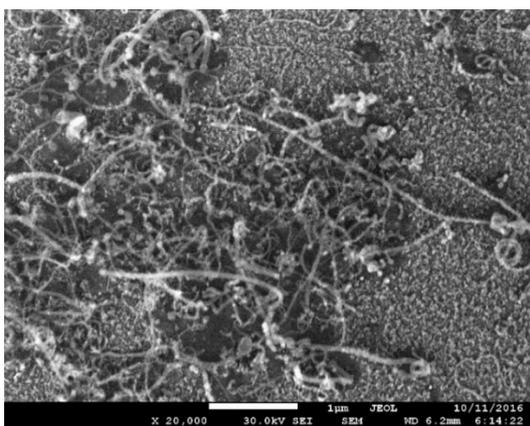
³МФТИ (ГУ)

⁴ИБХФ РАН

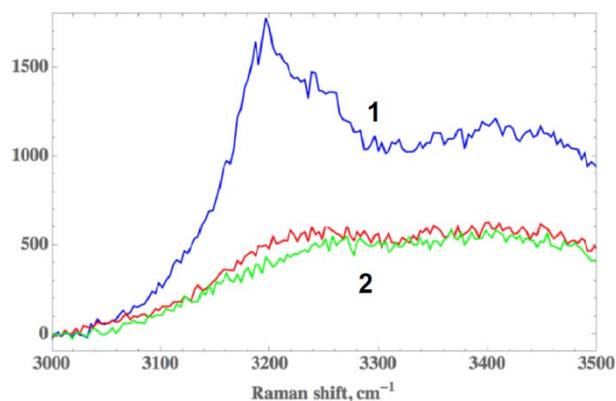
⁵МПУ

Исследуется эффект усиления сигнала комбинационного рассеяния (КР) света углеродными нанотрубками (УНТ). В качестве объекта исследования использована вода, спектр КР которой достаточно хорошо известен. В работе достигнуто усиление сигнала КР молекул воды в несколько сотен процентов (Рис. 1б). Показано, что существует оптимальная плотность нанотрубок на подложке, при которой достигается максимальное усиление сигнала КР. Этот эффект обусловлен рассеянием и экранированием плазмонов, возбуждаемых в УНТ соседними нанотрубками.

Однослойные нанотрубки синтезированы методом CVD с использованием метана в качестве углеродосодержащего газа. Катализатором роста служили частицы MoO_2 . Синтез УНТ производился в установке Planar Tech в трубке из кварцевого стекла, помещенной в печь. На Рис. 1а приведена типичная микрофотография массива УНТ, на изображении видны неупорядоченные скопления УНТ диаметром 10 – 30 нм.



(а)



(б)

Рис.1. (а) Сканирующая электронная микроскопия массива УНТ; (б) усиление рассеяния: спектр КР воды в присутствии УНТ (1) и на чистой подложке (2).

Эффект усиления сигнала КР обусловлен возникновением плазмонного резонанса в нанотрубках с металлической проводимостью. При использовании стандартных подходов к синтезу УНТ доля таких нанотрубок составляет около 1/3 от всех УНТ. Плазмонный резонанс эффективно возбуждается в трубках, длина которых меньше длины свободного пробега электрона. Величина этого параметра определяется концентрацией структурных дефектов в УНТ и обычно находится в диапазоне 0,5-1 мкм. Присутствие трубок большей длины может эффективно снижать сигнал КР. Электроны «движутся» по поверхности трубки, при этом «пси» функция выходит за границу УНТ на расстояние нескольких размеров элементарной ячейки. При пересечении двух УНТ электроны одной трубки «цепляются» за другую трубку, и длина свободного пробега сокращается. Электроны могут не только отражаться в точке пересечения двух УНТ, но и перескакивать между трубками. Прыжки электронов между УНТ приводят к сбою фазы «пси» функции и тоже могут сокращать длину свободного пробега. Квантовая теория движения электронов в системе перекрещивающихся УНТ – это задача для будущих исследований. Однако, наши оценки показывают, что наибольшее усиление следует ожидать в нематических структурах, где трубки вообще не скрещиваются.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-08-01448, программы Президиума РАН № 56 «Фундаментальные основы прорывных технологий в интересах национальной безопасности».

ФУРЬЕ-АНАЛИЗ ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ SERS-АКТИВНЫХ ПОДЛОЖЕК

Б.Д. Тонанайский¹, И.А. Богинская², И.А. Рыжиков², И.Н. Курочкин³,
И.А. Родионов⁴, А.С. Бабурин⁴, М.В. Седова², Н.Д. Ушаков¹

¹МФТИ (ГУ)

²ИТПЭ РАН

³ИБХФ РАН

⁴НОЦ «Функциональные микро/нано системы»

На данный момент отсутствует единая теория поверхностного усиления спектра комбинационного рассеяния (SERS-спектры) подложками со сложной морфологией. Показано, что различные топологические характеристики подложек определяют различные аспекты взаимодействия аналита с поверхностью и излучением. В частности, наношероховатость, эксцесс и наличие квазипериодических особенностей рельефа могут отвечать за смачиваемость, реакционную способность, плотность «горячих точек» (hotspots) и возбуждение плазмонов. В свою очередь все эти параметры влияют на интенсивность спектров комбинационного рассеяния (ГКР). В связи с этим возникла задача математического описания изображений, полученных с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ), и профилограмм поверхностей подложек с выявлением характерных величин.

Рассматривались рельефы поверхностей подложек, полученные с помощью АСМ на разных масштабах (3 мкм, 5 мкм, 10 мкм). На рисунке 1 приведено изображение поверхности подложки Ag192 в масштабе 10 мкм, а на рис. 2 — 3D график.

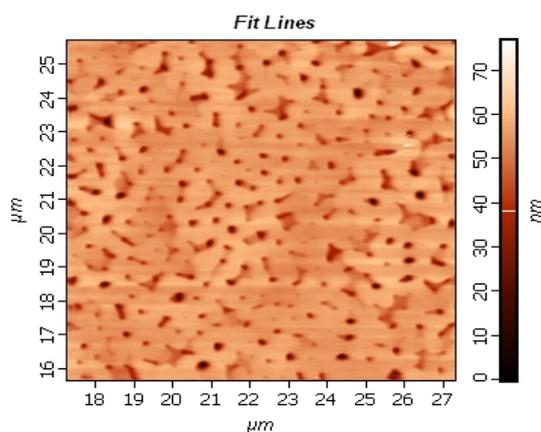


Рис. 1. Морфология подложки Ag192

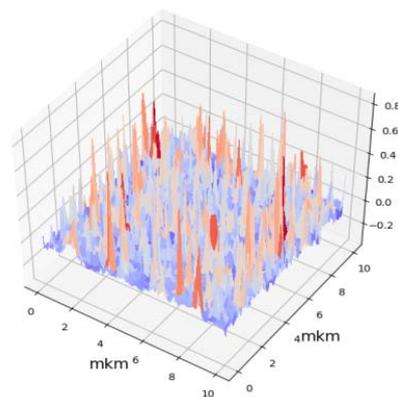


Рис. 2. Морфология подложки Ag192. 3D

Далее было произведено преобразование Фурье для анализа спектральной плотности, с целью выявления наиболее характерных частот для данного экземпляра. Также рассматривалась двумерная спектральная

плотность для масштаба 10 мкм.

Спектральная плотность центрировалась на 0, по осям отложены номер строки и столбца соответственно. Дальнейший анализ производился для спектров, усредненных по оси X и по оси Y. Построены усредненные плотности для осей X и Y, соответственно. Из графиков определено, что направления X и Y практически равнозначны с точки зрения распределения частот. Так же замечено, что основную массу спектральной плотности составляют частоты от 0.01 до 0.5 обратных сантиметров (соответствуют периоду от 0.2 до 10 мкм).

Определен характер зависимости убывания спектральной плотности с повышением частоты, это отчетливо видно в логарифмическом масштабе (рис. 3). Также логарифмический масштаб наталкивает на способ характеристики подложки тремя экспоненциальными функциями: видны две точки, в которых меняется характер зависимости в логарифмическом масштабе (особенно отчетливо это видно на спектре для масштаба 10мкм).

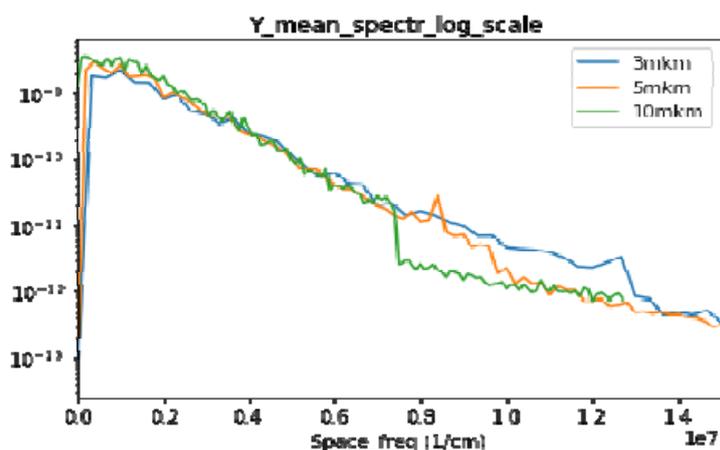


Рис.3. Характер зависимости убывания спектральной плотности с повышением частоты.

В ходе работы замечены осцилляции с периодами более 1 мкм, по-видимому, обусловленные шумами. Характер зависимости логарифма спектральной плотности меняется в точках, соответствующих периоду 500 нм и ~140 нм. Период порядка 500 нм соответствует возбуждению поверхностных плазмонов в пленке серебра, а период ~140 нм может отвечать условиям несмачиваемости и правильной конформации белка в процессе пробоподготовки. В дальнейшем будут подбираться функции для аппроксимации спектра подложки, что позволит прогнозировать аналитические характеристики используемых подложек.

СОЗДАНИЕ ПОДЛОЖЕК ДЛЯ ГКР-АНАЛИЗА МИОГЛОБИНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО ИСПАРЕНИЯ В ВАКУУМЕ

**В.А. Дерека¹, П.Е. Меньшиков¹, И.А. Богинская², И.А. Рыжиков²,
К.Н. Афанасьев², М.В. Седова²**

¹МФТИ (ГУ)

²ИТПЭ РАН

Целью работы является создание серебряных пленок с развитым рельефом и заданными значениями среднеквадратичной шероховатости и эксцесса и исследование возможности их использования для усиления сигнала комбинационного рассеяния белка миоглобина, осажденного из раствора с концентрациями от 5 нг/мл до 500 нг/мл путем высушивания на воздухе. Морфология формировалась, исходя из предположения, что существует несколько масштабов величин, ее характеризующих, каждый из которых влияет либо на поглощение света, либо на смачиваемость или величину флуктуаций поля на поверхности.

В результате с помощью электронно-лучевого испарения в вакууме были созданы пленки серебра с различной морфологией:

1. сформирована серебряная пленка с развитой морфологией (толщина ~150 нм) на толстой пленке алюминия (толщина ~1 мкм);
2. сформирована тонкая пленка серебра (толщина ~100 нм) на предварительно протравленном в растворе плавиковой кислоты предметном стекле;
3. сформированы тонкая пленка серебра толщиной 40 нм и пленка серебра толщиной 100 нм на оксиде церия толщиной до 2400 нм.

Все полученные образцы покрытий были исследованы с помощью оптических и зондовых методов. Исследование микроструктуры проводили при измерении морфологии подложки с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ Solver, NT-MDT, Россия) и интерференционного микроскопа на основе двухлучевого интерферометра (Zygo New View 7200, США). Оптические характеристики пленок исследовали с помощью эллипсометра (спектро-аналитическая платформа САГ-1981, Россия)

Исследуемые аналиты осаждали в виде капель объемом 3 мкл на анализируемые поверхности и высушивали на воздухе. Спектры комбинационного рассеяния аналита получали с помощью спектрометра комбинационного рассеяния WITec.

Показано влияние морфологии на спектры комбинационного рассеяния аналита. Были получены высокоамплитудные спектры белка на серебре, сформированном на протравленном в плавиковой кислоте стекле

(rms < 5 нм, эксцесс - 124) и на серебре толщиной более 100 нм, сформированном на оксиде церия (rms < 17 нм, эксцесс - 0.7). Показано отсутствие спектров на серебре, сформированном на алюминии с высокой шероховатостью (rms > 11 нм, эксцесс - 2), что говорит о существовании оптимального соотношения параметров морфологии для визуализации спектров высокомолекулярных веществ.

РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ РАСТВОРА БЕЛКА ДЛЯ КР-ИССЛЕДОВАНИЙ

И.А. Рыжиков¹, А.В. Зверев², И.А. Родионов², М.В. Седова¹,
И.А. Богинская¹, Н.Д. Ушаков³, И.Н. Курочкин⁴, Б.Д. Тонанайский³,
С.Ю. Мусатов⁵

¹ИТПЭ РАН

²НОЦ «Функциональные микро/наносистемы»

³МФТИ (ГУ)

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

⁵ООО Электронный Щит

Пробоподготовка сложных биологических объектов, таких как белки, бактерии, вирусы для регистрации их методом поверхностно-усиленного комбинационного рассеяния на подложках, представляющих собой тонкие 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 сушки является перспективным и актуальным методом для образцов растворов белков, поскольку позволяет увеличить скорость высушивания и не вызывает разложение белка.

На основании результатов исследований, полученных в предшествующий период, был разработан и изготовлен экспериментальный стенд. Он включает в себя генератор с тремя усилителями для разных частот работы пьезоэлементов; три ультразвуковые ванны для разных пьезоэлементов, на каждой ванне расположены держатели для ГКР подложек, нагреватель, охладитель и пьезодатчик для измерения конечной амплитуды ультразвуковой волны, доходящей до подложки через УЗ ванну; осциллограф с генератором SIGLENT Акип-4127/2А; мультиметр Keysight 34460А; источник питания Rohde&Schwarz; переносной мультиметр с термопарой. Установка позволяет изменять мощность ультразвукового воздействия на пробу, частоту воздействия, также можно поддерживать заданную температуру путем нагрева или охлаждения. Конструкция генератора предусматривает внесение изменений согласно потребностям научной группы.

На этапе опытной эксплуатации были проведены эксперименты по пробоподготовке раствора белка на подложках с серебряным напылением.

Показано, что воздействие ультразвука приводит к кристаллизации белка на площадях с малым размером с уменьшением времени пробоподготовки. Определены частоты и мощности УЗ воздействия, позволяющие получить спектры комбинационного рассеяния проб с наибольшей интенсивностью.

ПРОБОПОДГОТОВКА РАСТВОРОВ БЕЛКОВ ДЛЯ ГКР-ИССЛЕДОВАНИЙ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО И ТЕМПЕРАТУРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

**Д.В. Черкез¹, И.А. Богинская², И.А. Рыжиков², А.С. Ильин², И.В. Быков²,
М.В. Седова², И.Н. Курочкин³, И.А. Родионов⁴**

¹МФТИ (ГУ)

²ИТПЭ РАН

³ИБХФ РАН

⁴НОЦ «Функциональные микро/нано системы»

Разработка эффективных подложек для усиления сигнала комбинационного рассеяния биологических объектов является актуальной задачей для биомедицинских приложений. Однако не существует универсальных морфологий подложек для различных классов веществ. Также на получение эффективного сигнала влияют собственные свойства молекул и смачиваемость подложек. Использование оптимальных способов пробоподготовки позволит управлять микроструктурой исследуемых веществ, позволяя получать максимальные сигналы спектров комбинационного рассеяния целевых аналитов.

Проведено исследование влияния различных параметров пробоподготовки на конформацию молекул белка миоглобина на поверхности серебряных подложек с различной морфологией. В качестве воздействия были выбраны тепловая обработка и лазерная сушка в продолжение работ по высушиванию белков с помощью лазерного излучения для усиления сигнала их комбинационного рассеяния. Целью работы стало выявление оптимальных параметров пробоподготовки для получения кристаллоподобных форм белков с максимальной интенсивностью спектров комбинационного рассеяния, минимальной площадью области осаждения и минимальным временем высушивания.

В работе исследовали три типа ГКР-активных подложек на основе серебра с различной морфологией. В качестве аналита использовали водный раствор белка миоглобина с концентрациями 5 нг/мл – 1000 нг/мл. Для пробоподготовки был создан стенд с оптической лазерной системой и нагревательным столиком с температурным диапазоном 25 – 50 °С. Для высушивания использовали лазер с длиной волны 651 и 785 нм. Для исследования спектров комбинационного рассеяния подготовленных образцов использовали спектрометр комбинационного рассеяния WITec с лазерным возбуждением 785 нм. Объем высушиваемой капли составлял 3 мкл.

Было показано влияние пробоподготовки на морфологию высушенного белка, в результате которого возникали кристаллоподобные образования с

измененным спектром комбинационного рассеяния с усиленной амплитудой, ранее не описанным в литературе.

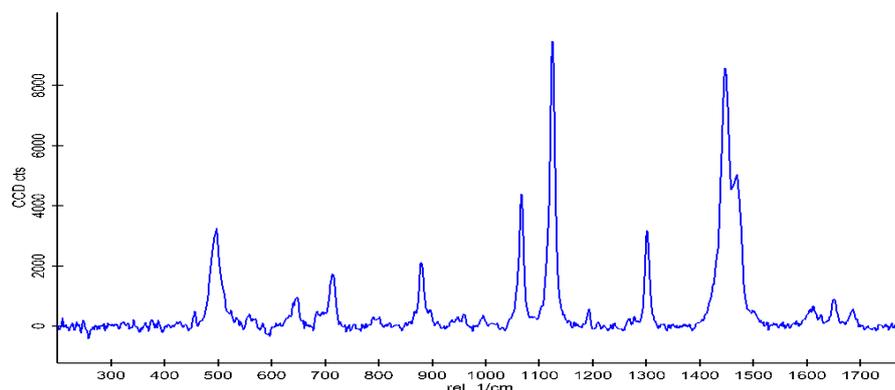


Рис. 1. ГР-спектр миоглобина

Наиболее эффективным методом пробоподготовки оказалось высушивание при комбинировании лазерного и теплового излучения, тогда как использование только теплового воздействия не обеспечивает электростатический контакт между образцом и подложкой, что приводит к появлению низкоамплитудных спектров. Использование только лазерного облучения увеличивает время высушивания пробы.

**ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛИ-П-КСИЛИЛЕНА
ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В МЕДИЦИНСКОЙ ТЕХНИКЕ**
А.Е. Михайлицын, А.В.Гусев, К.А. Маилян, К.Н. Афанасьев,
И.А. Рыжиков
ИТПЭ РАН

Многолетние циклы исследований и технологических разработок покрытий на основе поли-п-ксилилена позволили найти применение подобным покрытиям в различных областях за счёт своих уникальных свойств. Благодаря хорошим диэлектрическим свойствам этот материал можно использовать как тонкоплёночный изолятор, что и было сделано при разработке тонкоплёночных нагревателей для радиотелескопа “Спектр-УФ”. Такое покрытие также обладает хорошими оптическими свойствами, что позволило применить его в качестве защитного слоя для радиоотражающих оптически прозрачных покрытий для деталей остекления элементов авиационной техники. Иное применение в аэрокосмической промышленности нашла модификация поли-п-ксилиленового покрытия в качестве средства уменьшения газовой выделенности с поверхности теплового щита аппарата “Интергелиозонд”.

Поли-п-ксилилены - ароматические полимеры, которые формируются в виде тонкоплёночных покрытий, толщиной от 100 Å до 100 мкм на поверхности субстратов различной природы (металлы, пластмассы, эластомеры, композиты, керамика и др.) в процессе газовой полимеризации. В основе метода газовой полимеризационной осаждения лежит возможность генерирования в вакууме высокорекреационноспособных частиц – интермедиатов, адсорбция которых на твердых веществах сопровождается их самопроизвольной полимеризацией с образованием полимерного покрытия. Поли-п-ксилиленовые покрытия характеризуются прозрачностью, низкой влагонепроницаемостью, химической стойкостью, механической прочностью.

Одним из новейших применений поли-п-ксилиленового покрытия стало использование его в медицинской технике для создания кардиостимуляторов и матричного фотосенсора для рентгеновского аппарата.

В результате совместной работы с отечественным производителем кардиостимуляторов показано, что покрытие хлорзамещенного поли-п-ксилилена толщиной 10 мкм, нанесенное по разработанной методике на титановый корпус, а также на электронный модуль управления указанного изделия медицинской техники, повышает влагозащиту устройства, и, как следствие, снижает токи утечки. Это значительно увеличивает срок службы кардиостимулятора в целом, что является одной из ключевых

эксплуатационных характеристик устройства. Нанесение покрытия на силиконовые имплантируемые эндокардиальные электроды позволяет создать на их поверхности антифрикционное покрытие, значительно упрощающее их введение в организм человека. Проведенные исследования показали, что наносимое по оригинальной методике покрытие является безвредным для человека с точки зрения токсикологии и может длительное время находиться в теле человека.

В современных рентгеновских аппаратах запись, преобразование в цифровой формат и передача полученного снимка осуществляется при помощи матричного фотосенсора. Эта дорогостоящая деталь представляет собой самостоятельное электронное устройство, внешней поверхностью которого является пластина нитрида кремния. В ряде случаев при осуществлении некоторых технологических и подготовительных операций поверхность этой пластины может быть механически повреждена, что приводит к выходу из строя части элементов матрицы. Для устранения этой проблемы на поверхность кремниевой пластины было нанесено защитное оптическое полимерное покрытие. Нанесенное покрытие толщиной около 1 мкм позволило защитить поверхность нитрида кремния от механического воздействия при проведении последующих технологических операций.

ФОТОРЕЗИСТИВНЫЕ СВОЙСТВА ГРАНУЛИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ CdSe-CdS

С.В. Гуров¹, И.А. Рыжиков², И.А. Богинская², Ю.В. Трофимов³,
М.В. Седова², К.Н. Афанасьев²

¹МФТИ (ГУ)

²ИТПЭ РАН

³Центр светодиодных и оптоэлектронных технологий НАН

Эволюция современных радиотехнических систем, опто- и микроэлектроники невозможна без получения новых типов фоторезистивных материалов. Гранулярные структуры являются примерами подобных сред в силу их высокой фоточувствительности и фотопроводимости, а также аномальной температурной зависимости фотопроводимости. В связи с этим возникает необходимость исследования, направленного на определение общих закономерностей функционирования гранулярных фоторезистивных материалов с целью улучшения их характеристик и разработки новых систем.

Объектом исследования данной работы являются гранулярные полупроводники системы CdSe-S. Целью исследования является определение характера фотопроводимости гранулярных проводников системы CdSe-S. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- исследование зависимости фотосопротивления гранулярных полупроводников CdSe-CdS от мощности и длины волны падающего лазерного излучения;
- снятие вольт-амперной характеристики образцов;
- исследование температурной зависимости фотосопротивления;
- измерение темновых сопротивлений образцов;
- исследование морфологии образцов.

В процессе работы проводились экспериментальные исследования фотосопротивления трех видов полупроводниковых образцов CdS_xSe_{1-x} ($x = 0; 0.2; 0.5$) в зависимости от мощности и длины волны лазерного излучения. В результате исследования для трех типов образцов был выявлен степенной характер исследуемой зависимости сопротивления образцов от мощности лазерного излучения (в данном диапазоне мощностей): $R(P) = 1/(A+BP^C)$

При помощи тераомметра серии Е6-13А были проведены измерения темнового сопротивления для трех представленных образцов. Результаты измерений приведены в табл. 1. Выявлено, что для каждого из образцов вольт-амперная характеристика имеет следующий вид:

$$U = A I (U)^B, B = 0.8...0.95 \text{ (рис. 1).}$$

Табл. 1. Темновое сопротивление образцов.

CdS	CdS _{0.2} Se _{0.8}	CdS _{0.5} Se _{0.5}
0.25 ГОм	0.3 ГОм	0.18 ГОм

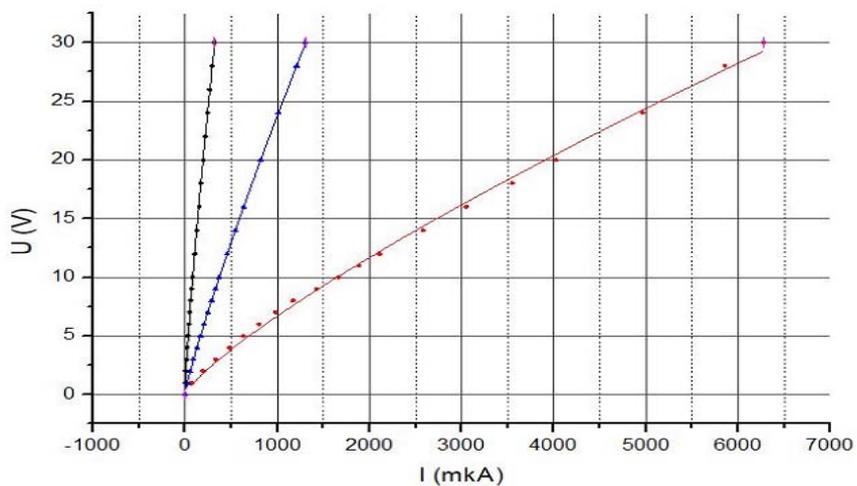


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики CdS.

Полученные результаты были использованы для построения теоретического объяснения закономерностей функционирования гранулярных фоторезистивных материалов.

РАССЕЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ КОЛЛИМАТОРА НА БОКОВОЙ СТЕНКЕ КОМПАКТНОГО ПОЛИГОНА

А.В. Никитенко, А.С. Зубов

ИТПЭ РАН

В данной работе рассмотрены некоторые особенности рассеяния электромагнитного поля на поглотителе пирамидальной формы, расположенном на боковой стенке компактного полигона. В частности, рассмотрены различия в скорости сходимости и локализации в пространстве высших дифракционных порядков в сравнении со случаем рассеяния на задней стенке камеры. В последнем случае поле коллиматора попадает на заднюю стенку практически перпендикулярно плоскости стенки, поэтому поля высших гармоник (порядка минус 30 дБ) существенно превышают по амплитуде поле зеркального отражения (порядка минус 70 дБ) [1]. В случае же рассеяния на боковой стенке угол падения близок к 90 градусам, поэтому зеркальное отражение по амплитуде превосходит высшие гармоники (минус 20 дБ в сравнении с минус 35 дБ) и поэтому является определяющим фактором. Однако, максимумы амплитуды этих полей имеют различную локализацию в пространстве. В данной работе мы показываем, что различное распределение этих полей в пространстве камеры может приводить к тому, что высшие гармоники вносят наибольший вклад в неравномерность поля в рабочей зоне компактного полигона. Представлен модифицированный метод [2] расчета рассеяния от боковой стенки компактного полигона, учитывающий указанные особенности. Исследованы численные свойства алгоритма, в частности, скорость сходимости в зависимости от числа точек расчетной сетки, а также рассмотрены численные артефакты алгоритма и предложены методы борьбы с ними. Выведены практические рекомендации для выбора значений параметров расчета исходя из требуемой точности. С помощью алгоритма проведены расчеты для модели компактного полигона, показано, что величины амплитуд побочных гармоник в рабочей зоне полигона могут достигать минус 35 дБ (рис. 1) и выше.

Аналогичный результат получен при исследовании влияния высших гармоник на поле в рабочей зоне рупорной безэховой камеры. В некоторых случаях рассеяние на боковой стенке приводит к появлению побочных гармоник с амплитудой, превышающей минус 30 дБ.

Предложенный алгоритм расчета позволяет проводить численное моделирование для оптимизации выбора радиопоглощающего материала и схемы его размещения.

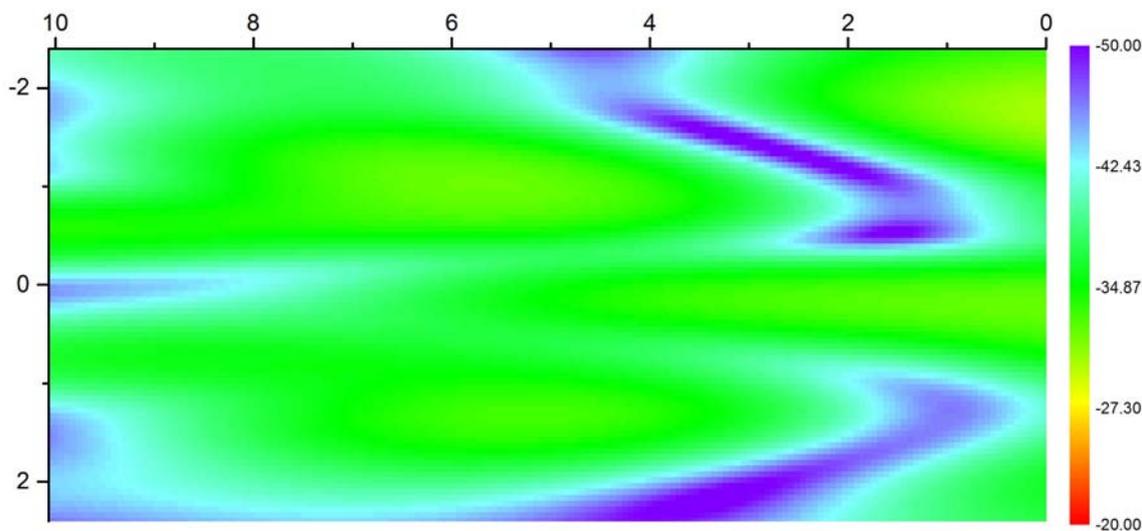


Рис. 1. Поле высшей гармоники, отраженной от пирамидального РПМ на боковой стенке компактного полигона. Сечение, параллельное стенке, на расстоянии 2.8 м (центр рабочей зоны).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Балабуха Н.П., Зубов А.С., Солосин В.С. Компактные полигоны для измерения характеристик рассеяния. М.:Наука, 2007.
- [2] 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/jre/dec14/15/text.pdf>

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ЗЕРКАЛЕ КОЛЛИМАТОРА В АИК-КП

С.А. Федоров¹, Р.Р.о. Сулейманов²

¹ИТПЭ РАН

²МФТИ (ГУ)

Разработана и изготовлена система контроля температуры на зеркале коллиматора в АИК-КП ИТПЭ РАН. Измерение температуры осуществляется с помощью пяти датчиков температуры, расположенных в центральной зоне зеркала. Система контроля позволяет обрабатывать данные с датчиков и сохранять результаты измерения на жесткий диск компьютера. Необходимость разработки обусловлена тем, что при разбросе температуры по зеркалу в несколько градусов плоскостность электромагнитной волны в рабочей зоне компактного полигона заметно нарушается.

Эксплуатация в течении года системы контроля температуры показала, что разница температур между датчиками достигала не более 1,2 градуса и в среднем составляла 0,2 градуса. Такие значения показывают, что можно не использовать климатическую установку для АИК-КП, а использовать только центральную систему отопления здания. При проектировании компактных полигонов, применение схемы расположения, подобной используемой в АИК-КП при контроле температур, позволяет отказаться от дорогостоящей климатической установки.

В докладе показаны зависимости температур от времени суток и в момент отключения и включения системы центрального отопления. Даны рекомендации по калибровке радиотехнической аппаратуры для измерения диаграмм обратного рассеяния объектов.

ПОЛОЖИТЕЛЬНОЕ МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЕ В МАГНИТНЫХ НАНОКОМПОЗИТАХ В СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

М. Блинов¹, М. Шахов², Е. Lahderanta³, В. Рыльков^{4,5}, А. Грановский^{1,5}

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

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе

³Lappeenranta University of Technology, Finland

⁴НИЦ "Курчатовский институт"

⁵ИТПЭ РАН

Так как магнитное поле приводит к подавлению беспорядка в магнитной подсистеме, то, как правило, как в однородных, так и неоднородных ферромагнетиках магнитосопротивление (МС) отрицательно. В работе [1] в тонких магнитных пленках Ni, Co, Fe и в магнитных наноконпозитах наблюдалось изотропное линейное положительное МС, которое не насыщалось вплоть до 60 Тл. Этот эффект связывался с влиянием сильного магнитного поля на квантовые поправки к проводимости, обусловленные электрон-электронным взаимодействием, но проведенные оценки не позволили объяснить величину эффекта в наноконпозитах, и возможность проявления квантовых поправок при относительно высоких температурах (100-200 К) осталась неясной.

В настоящей работе приводятся результаты исследования МС в наноконпозитах $(\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2)_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$ и $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ при содержании ферромагнитной компоненты $x=47-57$ at.% вблизи порога перколяции в импульсных магнитных полях до 30 Тл при 50-300 К. Для всех исследованных образцов МС в полях меньших поля насыщения отрицательно, не превышает 1% для $(\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2)_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$ и 3% для $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$, практически изотропно. Это указывает на превалирующую роль спин-зависящего туннелирования в формировании МС. В полях больших поля насыщения наблюдается слабый положительный, линейный по полю вклад в МС, но не во всех образцах. Положительный вклад в МС явно выражен при $T < 200$ К в наноконпозитах $(\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2)_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$, причем не в непосредственной близости к порогу перколяции, который по оценкам составляет 46-47 at.% , а при 50-57 at.% . Более того, для образца с $x=57$ at.% положительный вклад больше отрицательного при поле > 1 Тл. Для объяснения полученных данных нами в рамках простой теории туннельного МС в наноконпозитах [2] рассчитано МС с учетом зависимости от магнитного поля высоты туннельного барьера.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] A. Gerber *et al.*, Phys. Rev. Lett., **99**, 027201 (2007).
[2]. J.Inoue, S. Maekawa, Phys.Rev. B **53**, R11927 (1996).

ОЦЕНКА СОБСТВЕННОЙ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ НИКЕЛЯ ИЗ СВЧ МАТЕРИАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОМПОЗИТОВ С ПОРОШКАМИ НИКЕЛЯ

**С.Н. Старостенко, К.Н. Розанов, А.О. Ширяев, В.А. Гаранов,
А.Н. Лагарьков**
ИТПЭ РАН

Проведена оценка СВЧ магнитной проницаемости никеля из измеренных материальных параметров модельных изотропных композитов на основе парафина, наполненных сферами или чешуйками никеля. Проницаемость металла определена с учетом скинирования. Материальные параметры измерены в коаксиальной линии полосе частот 0.001-20ГГц методом отражения-прохождения. Рассмотрено влияние размера, формы и объемной доли частиц никеля на диэлектрический и магнитный спектр композита. Расчет магнитной проницаемости частиц металла основан на обработке измеренных зависимостей материальных параметров смеси от частоты и концентрации металла. Для описания массива измеренных значений диэлектрической и магнитной проницаемостей смесей используется упрощенная для одномерного анизотропного композита модель Сихволы, записанная в терминах относительной восприимчивости χ .

$$p\chi_{12}/\chi_{32} - 1 = N\chi_{12}(1-p)/(1+a\chi_{32}) \quad (1)$$

Здесь индексы 1,2 и 3 относятся к частице, полимерной связке и композиту; χ_{12} - восприимчивость частицы, нормированная на магнитную μ_2 или диэлектрическую ε_2 проницаемость связки (для парафина $\varepsilon_2=2.3$, $\mu_2=1$), χ_{32} - нормированная восприимчивость смеси, N - форм-фактор частицы (коэффициент деполяризации), a - параметр структуры смеси.

Используемая модель смешения справедлива для широкого контраста свойств компонентов смеси, учитывает форму частиц, а также спектральную функцию (функцию Бергмана-Милтона), определяющую распределение частиц по эффективным форм-факторам. За счет изменения параметра a выражение (1) может превращаться в формулы Максвелла Гарнетта ($a=0$), Брюгемана ($a=1-N$), когерентного потенциала ($a=1$), Винера ($a=\infty$) и Оделевского (при $\chi_{12} \gg \chi_{32}$ и $a=N(p_c^{-1}-1)$, где p_c - порог перколяции).

Порог перколяции имеет более ясный физический смысл, чем параметр a , потому выражение (1) целесообразно переписать в форме:

$$p \times \chi_{12} / \chi_{32} - 1 = N\chi_{12}(1-p) / \left[1 + N(1-p_c^{-1})\chi_{32} \right] \quad (2)$$

Так как $\chi_{\varepsilon 12} \rightarrow \infty$, а $\chi_{\varepsilon 12} \gg \chi_{\mu 12}$, то диэлектрическая восприимчивость смеси $\chi_{\varepsilon 32}$ определяется только формой N и концентрацией p включений, а магнитная $\chi_{\mu 32}$ зависит также и от магнитной восприимчивости частиц $\chi_{\mu 12}$.

Таким образом, $\chi_{\mu 12}$ может быть найдена как параметр уравнения (2) совместно с p_c и N при обработке массива экспериментальных значений материальных параметров смеси. Величины p_c и N являются константами для данной формы частицы, а $\chi_{\mu 12}$ зависит и от частоты. При поиске p_c , N и $\chi_{\mu 12}(f)$ одновременно обрабатывались концентрационные зависимости статической диэлектрической и динамической магнитной проницаемостей смеси и минимизировалась сумма среднеквадратичных отклонений магнитной восприимчивости смеси $\Sigma \Delta \chi_{\mu 12}(f, p)$ по всему измеренному массиву данных.

На рис.1 представлена аппроксимация статических диэлектрической и магнитной восприимчивостей смеси по формулам Сихволы (сплошные линии) и Оделевского (пунктир). На рис.2 представлены частотные зависимости магнитной проницаемости сфер (черные линии), чешуек (темно-серые линии), а также самого никеля (светло-серые линии для сфер, для чешуек вклад скинирования мал).

Величины статической магнитной проницаемости никеля в чешуйках и сферических частицах близки, а частотные зависимости, как и в случае частиц альсифера [1,2], различаются. Величины СВЧ магнитной проницаемости близки по порядку величины к данным, полученным на толстых никелевых проволоках и фольгах [3].

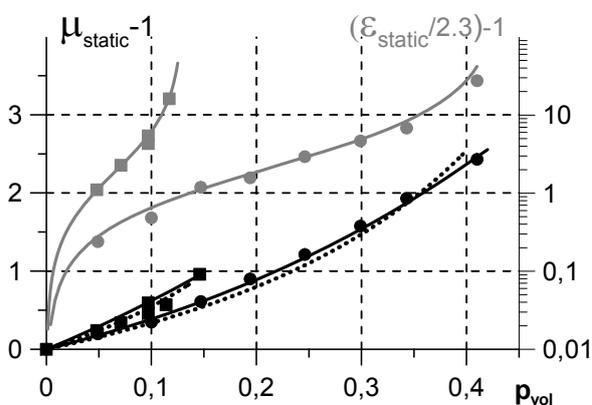


Рис. 1. Концентрационная зависимость статической диэлектрической (серые линии и точки) и магнитной (черные линии и точки) восприимчивости смеси со сферами и чешуйками никеля

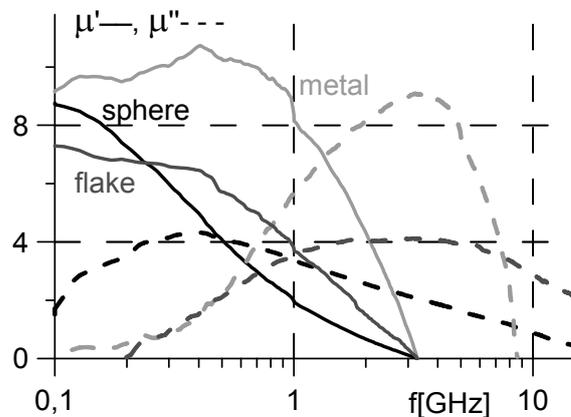


Рис. 2. Частотная зависимость магнитной проницаемости сфер и чешуек (черные и темно-серые линии). Светло-серые линии – проницаемость металла (из проницаемости сфер вычтен вклад скинирования)

ЛИТЕРАТУРА

- [1] S.N. Starostenko et al., J. Appl. Phys. vol.121, 2017, p.245107.
- [2] S.N. Starostenko et al., JMMM, accepted for publication, Nov. 2017.
- [3] R. M. Bozorth, Ferromagnetism, D. Van Nostrand Co. Inc., 1951.

ИЗМЕРЕНИЯ ТОНКИХ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ПЛЕНОК МЕТОДАМИ ФМР И ПРОХОЖДЕНИЯ-ОТРАЖЕНИЯ

А.О. Ширяев¹, К.Н. Розанов¹, С.Ю. Бобровский¹, С.С. Маклаков¹,
А.В. Осипов¹, С.А. Вызулин², А.Б. Грановский^{1,3}

¹ИТПЭ РАН

²Краснодарское высшее военное училище им. генерала армии

С.М. Штеменко

³МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет

Для измерения магнитных характеристик материалов часто используют метод ферромагнитного резонанса (ФМР). Он обладает высокой чувствительностью, однако не всегда можно быть уверенным в том, что образец намагничен до насыщения. Кроме того, в большинстве практических применений материалы используются в размагниченном состоянии. Цель исследования состоит в том, чтобы с помощью измерений методом прохождения-отражения в коаксиальной линии при приложении внешнего постоянного магнитного поля подробнее изучить переход в намагниченное состояние, связать характеристики материалов в намагниченном и ненамагниченном состояниях и сравнить данные, полученные с помощью двух методов.

Исследованные образцы представляют собой тонкие пленки кобальта, полученные путем магнетронного напыления на гибкую лавсановую подложку. Особенности напыления таковы, что пленки обладают анизотропией в плоскости, поэтому они исследованы в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Измерены частотные зависимости магнитной проницаемости пленок методом прохождения-отражения во внешнем постоянном магнитном поле и полевые зависимости поглощения методом ФМР. Дополнительно были проведены магнитометрические измерения.

На рисунке 1 представлены измеренные частотные зависимости магнитной проницаемости μ пленки. При отсутствии внешнего магнитного поля наблюдаются два резонанса, на 3 ГГц и на 6 ГГц. Высокочастотный резонанс исчезает во внешнем поле порядка 400Э, когда, согласно данным магнитометрии, пленка намагничивается до насыщения. Наблюдаемые частотные зависимости аппроксимированы резонансами Лоренца, из которых с помощью формул из [1] найден параметр затухания α . Параметр затухания, представленный на рисунке 2, остается постоянным при изменении поля. Из этого можно предположить, что низкочастотный резонанс связан с однородным ФМР, а высокочастотный – с наличием доменной структуры.

Резонансное поле на частоте 9.15 ГГц совпадает для обоих методов.

Намагниченность насыщения материала была найдена из магнитометрических измерений, аппроксимации частотных зависимостей формулой Лоренца [1] и аппроксимации зависимости частоты резонанса от приложенного поля формулой Киттеля [2]. Согласно магнитометрическим данным, намагниченность насыщения составляет 1,8 Т для обоих направлений. Аппроксимация зависимости частоты резонанса от приложенного поля формулой Киттеля [2] дает значение намагниченности насыщения 1,4 Т для обоих направлений.

Таким образом, наблюдается количественное согласие данных, полученных двумя методами. С помощью коаксиальных измерений в слабых магнитных полях возможно определение природы резонансов.

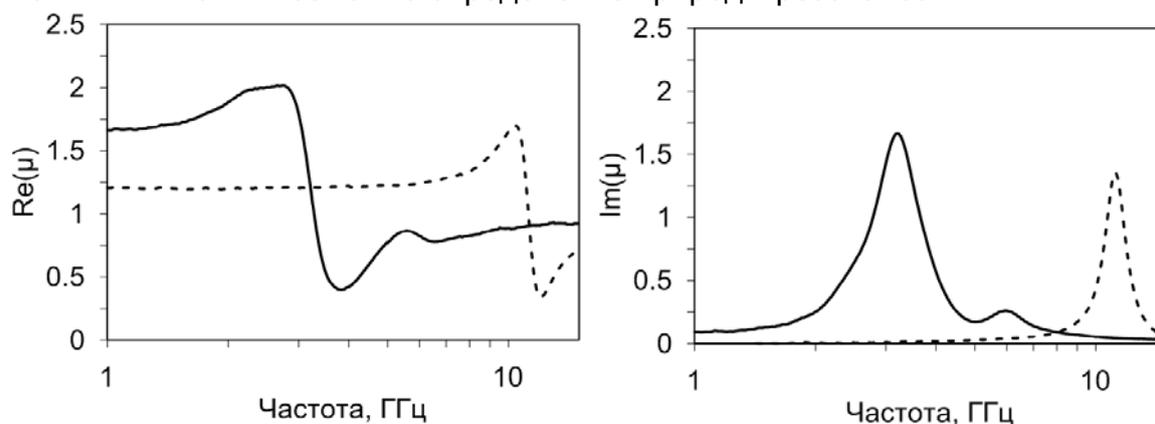


Рис. 1. Измеренная частотная зависимость магнитной проницаемости образцов на основе тонких пленок кобальта. Сплошными линиями обозначена проницаемость в отсутствии внешнего поля, штриховыми – во внешнем поле напряженностью 935 Э.

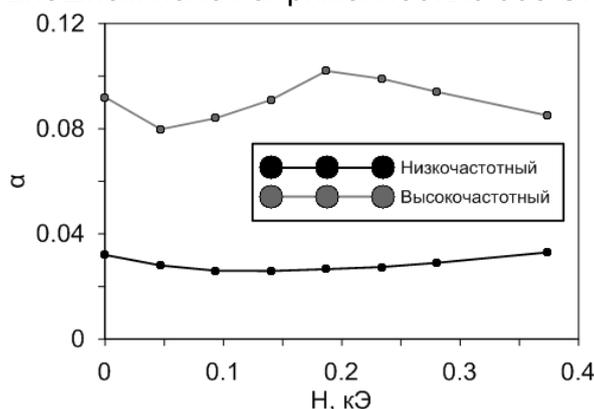


Рис. 2. Зависимость параметров затухания от внешнего постоянного магнитного поля. Черной линией показана аппроксимация низкочастотного резонанса, серой – высокочастотного.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] K.N. Rozanov, M.Y. Koledintseva, J. Appl. Phys. 119 (2016), p. 073901.
 [2] C. Kittel, Phys. Rev. 73, (1948), p. 155.

ИЗМЕРЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ КОМПОЗИТНЫХ ОБРАЗЦОВ ВБЛИЗИ ПОРОГА ПРОТЕКАНИЯ

Д.П. Лелюк, Д.А. Петров, К.Н. Розанов

ИТПЭ РАН

При исследовании диэлектрической и магнитной проницаемости композитов интерес представляют концентрации наполнителя вблизи порога протекания, поскольку в области предельного наполнения возможно получить наиболее высокие значения материальных параметров. Однако в измерительной линии между образцом и коаксиальной ячейкой возникает воздушный зазор, который вносит погрешность в получаемые величины. Это затрудняет точный расчет форм-фактора N из значения СВЧ диэлектрической проницаемости $\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon''$, например, по обобщенной модели Максвелл Гарнета - формуле Оделевского.

В качестве матрицы композитных материалов при проведении таких исследований чаще всего используется парафин, который предоставляет широкие возможности для исследования свойств наполнителей композитов. Целью данной работы является исследование возможности минимизации воздушного зазора в случае композитов с пластичной матрицей.

В работе использован метод Николсона-Росса-Уира измерения материальных параметров в коаксиальной ячейке в полосе частот f от 0.1 до 20 ГГц для различных объемных концентраций порошка Fe, размолотого в полиэтилене (FePE/S) и полистироле (FePS/S) и помещенного в парафиновую матрицу. После помещения в ячейку образец подвергался допрессовке пуансоном.

Наблюдается систематическое уменьшение ε для образцов, измеренных без дополнительного прессования внутри измерительной ячейки (рис. 1).

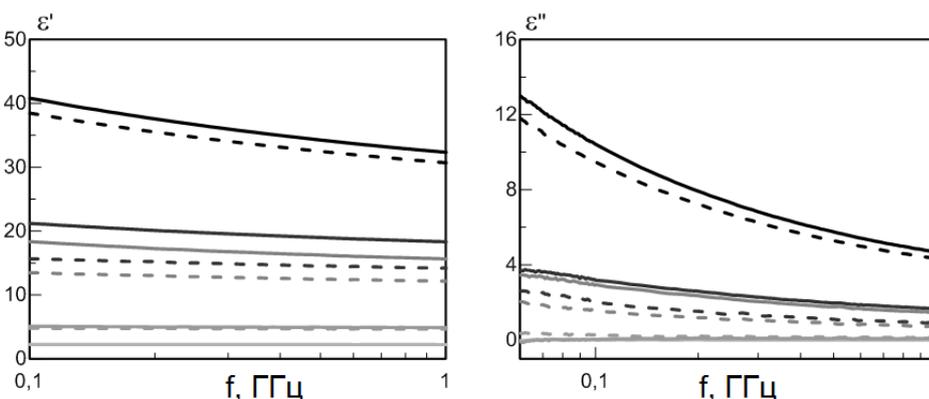


Рис. 1. Частотная зависимость диэлектрической проницаемости образца FePS/S для концентраций наполнителя от 0% (светлая линия) до 25% (черная линия) без допрессовки (штриховая линия) и с допрессовкой (сплошная линия).

Проведены непосредственные измерения удельной проводимости образца σ , из которой была пересчитана ε'' . Анализ измеренных диэлектрических проницаемостей проведен с использованием формулы:

$$\varepsilon'' = -\frac{\pi f}{2} \frac{d\varepsilon'}{df} + \frac{2\sigma}{f}, \quad (1)$$

которая является следствием из соотношений Крамерса-Кронига, справедливым при низком тангенсе угла диэлектрических потерь.

На рис. 2 приведены частотные зависимости ε'' , полученные из статической проводимости образца (ε''_{σ}) и с использованием (1) из измерений ε' в коаксиальной ячейке ($\varepsilon''_{КК}$). Приведены графики для двух случаев: образец без допрессовки и образец с допрессовкой. Значение ε' на частоте 1 ГГц составляет 18.2 для допрессованного образца и 14.2 без допрессовки.

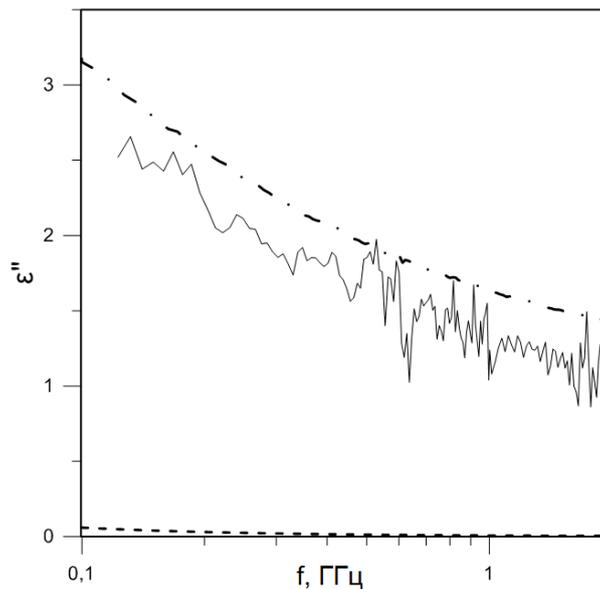


Рис. 2. Частотная зависимость мнимой части диэлектрической проницаемости образца FePS/S для концентрации наполнителя 20%: измеренная ε'' (штрихпунктирная линия), пересчитанная из проводимости ε''_{σ} (штриховая линия) и $\varepsilon''_{КК}$ из (1) (сплошная линия).

Из рис. 2 видно, что в случае допрессованного образца вклад статической проводимости мал, а измеряемая в ячейке ε'' хорошо совпадает с $\varepsilon''_{КК}$, рассчитанной из соотношения (1). Проведена численная оценка воздушного зазора для недопрессованного образца: для FePS/S с концентрацией 20% он составляет ~ 50 мкм. Таким образом, допрессовка образца в ячейке перед измерениями позволяет минимизировать влияние воздушного зазора.

ПЛЕНКИ ПЕРМАЛЛОЯ, ПОЛУЧЕННЫЕ РЕАКТИВНЫМ МАГНЕТРОННЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ С МАЛОЙ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ РЕАКТИВНОГО ГАЗА

А.С. Набоко¹, С.С. Маклаков¹, С.А. Маклаков¹, С.Ю. Бобровский¹,
А.В. Осипов¹, Д.А. Петров¹, В.И. Полозов^{1,2}, И.А. Рыжиков¹,
К.Н. Розанов¹, И.Т. Якубов¹

¹ИТПЭ РАН

²МФТИ (ГУ)

Магнитомягкие пленки находят широкое применение в решении проблем электромагнитной совместимости. Важной задачей является получение материала с управляемой частотой естественного ферромагнитного резонанса при сохранении магнитомягких свойства ферромагнетика.

Изучены свойства тонких (160 нм) ферромагнитных пленок магнитомягкого сплава NiFe на гибкой подложке полиэтилентерефталата (PET) толщиной 12 мкм. Рассмотрена серия пленок, полученных методом магнетронного распыления на постоянном токе в вакууме при разном парциальном давлении кислорода в смеси рабочего газа (O₂+Ar) от $8,4 \cdot 10^{-7}$ Торр до $4,1 \cdot 10^{-5}$ Торр. Исследована морфология поверхности, произведена оценка напряженности металлических слоев, установлена связь с СВЧ характеристиками пленок.

Показано, что с ростом концентрации кислорода в смеси рабочего газа (от 0 до 5 об. %) наблюдались уменьшение среднего размера зерна поликристаллической пленки с 50 нм до 20 нм и повышение однородности формы зерна. Одновременно отмечалось уменьшение напряженности металлического слоя. Для определения напряженности измеряли радиус кривизны образцов пленки на PET подложке в свободном состоянии. Измерение электрического сопротивления пленок показало немонотонную зависимость данного параметра от концентрации кислорода, что может быть следствием качественного изменения микроструктуры пленки.

СВЧ измерения [1] показали, что увеличение концентрации реактивного газа приводит к появлению анизотропии магнитной проницаемости в плоскости плёнки: в одном направлении понижается квазистатическое значение магнитной проницаемости и добротность резонанса, перпендикулярно этому направлению характеристики плёнки остаются неизменными. При этом, по данным гамма-резонансной спектроскопии, вектор магнитного момента во всех случаях находится в плоскости плёнки. Других признаков изменения структуры плёнки при введении кислорода, (например, образования оксидных фаз) не было.

В направлении, чувствительном к введению кислорода, с увеличением концентрации кислорода наблюдалось немонокотное изменение магнитострикции пленки, с максимальным ее проявлением при содержании O_2 2 об.%. При этом, частота естественного ферромагнитного резонанса (ЕФМР) изменяется от 0,8 до 1,0 ГГц. В перпендикулярном направлении эта величина сохраняет свое характерное значение, равное 1,3 ГГц. Магнитостатические измерения показали стабильность значения коэрцитивной силы $H_c = 5,6$ Э и намагниченности насыщения $M = 0,72$ Тл при разной концентрации кислорода.

Полученные данные свидетельствуют о том, что введение малого количества реактивного газа влияет на механизм роста металлических пленок. Примесь кислорода оказывает влияние на размер зерна формируемой поликристаллической пленки и, как следствие, на напряженность металлического слоя и его электрическое сопротивление. Также, введение контролируемой примеси кислорода позволяет влиять в широком диапазоне на магнитную анизотропию пленки и управлять величиной магнитострикционного эффекта. Ранее [2] было рассмотрено влияние толщины и количества металлических слоев NiFe на магнитные свойства. В текущей работе представлен дополнительный фактор – контролируемое введение малого количества кислорода в газовую фазу, расширяющий возможности управления СВЧ-параметрами магнитомягкого материала.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *K.N. Rozanov et al.* J. Communic. Technol. Electron., vol. 47, 2002. P.210.
- [2] *P.A. Zezyulina et al.* IEEE Magnetics Letters, vol. 7, 2016. 3705804.

ОТЖИГ ТОНКИХ ПЛЁНОК VO_{2+x} ВЫШЕ ТОЧКИ ПЛАВЛЕНИЯ

С.С. Маклаков¹, В.И. Полозов^{1,2}, С.А.Маклаков¹,

И.А. Рыжиков¹, В.Н. Кисель¹

¹ИТПЭ РАН

²МФТИ (ГУ)

При использовании реактивного магнетронного распыления для получения тонких плёнок VO_2 существует два способа влияния на структуру плёнок. Условия распыления и осаждения покрытия на подложку определяют состав, а условия последующего отжига определяют структуру плёнок.

Разработана новая методика получения VO_2 : плёнки с ярко выраженным переходом «металл-диэлектрик» формируются при отжиге покрытий VO_{2+x} выше точки плавления в инертной атмосфере, а состав VO_{2+x} подбирается и точно настраивается при помощи смещения на подложке по значению электропроводности покрытия. Отрицательное электрическое смещение на подложке влияет на состав плёнки сложным немонотонным образом. По этой причине существует более одной «оптимальной» комбинации условий получения данного материала. Отжиг вызывает перекристаллизацию, которая происходит в соответствии с диаграммой состояния V-O. Разброс размеров кристаллитов оказывается более важной характеристикой для свойств перехода, чем максимальный размер кристаллита VO_2 . Сложная зависимость состава $VO_{2\pm x}$ от условий нанесения и разное отражение диффузионных и кинетических факторов, изменяющих структуру плёнки при отжиге, приводят к тому, что для каждого конкретного состава VO_{2+x} необходима оптимизация времени выдержки для получения VO_2 высокого качества.

Исследование проведено на поликристаллической подложке для исключения влияния эпитаксиальных процессов. Дальнейшая работа направлена на исследование роли состояния поверхности подложки в обнаруженных явлениях.

ЛАМИНАТЫ НА ОСНОВЕ ТОНКИХ МАГНИТНЫХ ПЛЕНОК: ЗАВИСИМОСТЬ СВЧ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ОТ ПАРАМЕТРОВ СЛОЕВ

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

Ламинированные материалы на основе тонких магнитных пленок позволяют получить высокие значения СВЧ магнитной проницаемости [1]. Так как при превышении толщиной магнитных слоев предельной величины (порядка субмикрон) их свойства существенно падают [2], увеличение объемного содержания магнитной фазы для повышения эффективности применения таких материалов возможно только за счет нанесения большего числа магнитных слоев на одну полимерную подложку. Предельное число слоев будет определяться как магнитными свойствами ламината (с увеличением числа слоев они деградируют [3], рис. 1), так и механическими (ввиду накопления напряжений растут ломкость материала, отслоение).

В докладе представлены результаты исследования зависимости СВЧ магнитной проницаемости ламинатов на основе различных ферромагнетиков от количества магнитных и диэлектрических слоев и их толщин. Оптимизация этих параметров позволила почти на два порядка увеличить содержание магнетика в ламинате – до 22% – без существенной потери СВЧ свойств.

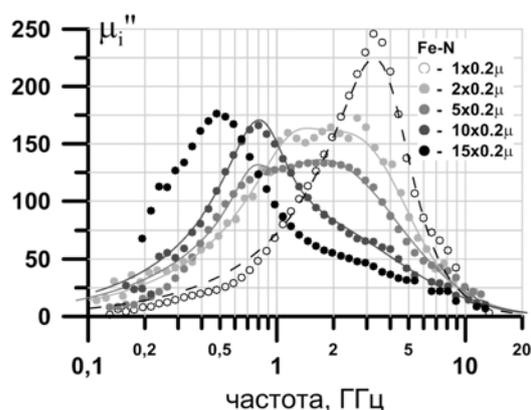


Рис. 1. Частотная зависимость мнимой части магнитной проницаемости Fe-N в ламинатах с разным числом слоев.

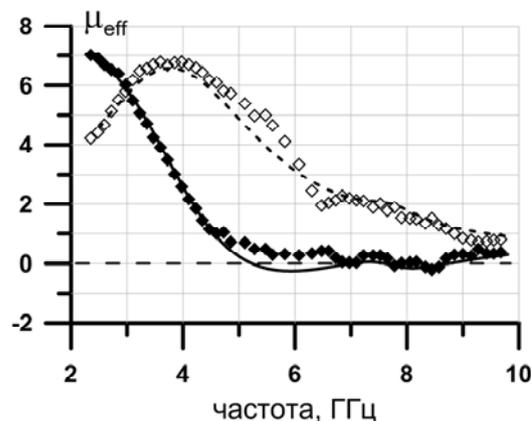


Рис. 2. Частотная зависимость магнитной проницаемости ламината на основе Fe₆₅Co₃₅.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *I.T. Yakubov et al*, AIP ADV. 4, 107143 (2014).
- [2] *S.Y. Bobrovskii et al*, J. Magn. Magn. Mater., in press.
- [3] *A.V. Osipov et al*, PIRS Proceedings, August 27-30 2007, Prague, Czech Republic, p. 242-245.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОНКИХ ПЛЁНОК VO₂ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ПРИКЛАДНЫХ ЦЕЛЯХ

**В.И. Полозов^{1,2}, С.С. Маклаков¹, С.А.Маклаков¹, Л.А. Алексеева¹,
А.С. Набоко¹, А.Д. Косов³, А.Д. Мишин¹, Д.А. Петров¹, И.А. Рыжиков¹,
В.Н. Кисель¹**

¹ИТПЭ РАН

²МФТИ (ГУ)

³МГУ им. М.В. Ломоносова, Химический факультет

Тонкие плёнки диоксида ванадия испытывают переход полупроводник-металл при ~67°С, или при приложении электрического поля напряженностью порядка 10⁶ В/м. Возможные технические приложения этого материала могут быть связаны с влиянием температуры, электрического тока или напряжения на его электрофизические свойства.

Исследованы тонкие плёнки VO₂, полученные в двухстадийном процессе, который состоит из ВЧ реактивного магнетронного распыления V с осаждением на нагретую поликристаллическую Al₂O₃ подложку и последующего отжига. Отношение сопротивлений плёнок в полупроводниковом (при 30°С равно 10⁶ Ом/□) и металлическом состояниях (при 80°С равно 650 Ом/□) Rs/Rm=1540. Переход происходит при 53°С. Температурная зависимость сопротивления плёнки имеет гистерезис с шириной 6°С.

Было проведено измерение температурной зависимости коэффициента пропускания (S₂₁) полученными образцами СВЧ излучения частотой 6-20 ГГц в диапазоне от 20°С до 80°С. Использован составной образец из 4 пластин VO₂ размером 5х6 см. Измерение частотной зависимости коэффициента пропускания образца проводили квазиоптическим методом с использованием печи с радиопрозрачными окнами. Коэффициент S₂₁ при переходе в «металлическое» состояние уменьшается на 0,5 - 1 дБ по сравнению с «полупроводниковым», в котором он составляет -0.25 дБ. При переходе образец демонстрирует гистерезис, как и в случае контактного электростатического измерения сопротивления. Дополнительные эксперименты с разными нагревательными устройствами показали, что отличия в температуре перехода и ширине гистерезиса, которые могут быть получены при нагреве одного и того же образца разным способом, связаны с теплоёмкостью и инерционностью измерительной системы в целом.

Исследована возможность формирования на основе плёнки структур методом фотолитографии. На поверхность VO₂ нанесены контактные

площадки из Fe на расстоянии от 10 мкм до 1 см. Контактные площадки имеют хорошую адгезию и ровные края. Получены вольт-амперные характеристики (ВАХ) таких «гантелей», а также измерен коэффициент S_{21} в диапазоне частот от 0 до 100 МГц. ВАХ имеет резкий перегиб при переходе полупроводник-металл при приложении критического напряжения U_{cr} . Для образца размером 10 мкм U_{cr} составляет 11 В. Аналогично температурной зависимости сопротивления, ВАХ имеет гистерезис, величина которого зависит от размеров «гантели». Измерения S_{21} , проведенные на векторном анализаторе цепей, также демонстрируют резкое изменение S_{21} при переходе.

Реализованный двухстадийный процесс позволяет получать тонкие (толщиной 120 нм) плёнки VO_2 с высокой амплитудой перехода металл-диэлектрик. Хорошая адгезия плёнок позволяет формировать на ней структуры микрометровых размеров. Сохраняющаяся после процесса фотолитографии высокая амплитуда перехода, который может быть инициирован как приложением U_{cr} , так и нагревом, позволяет использовать такие структуры в различных микроэлектронных приложениях вплоть до логических элементов. Измерения, проведенные в СВЧ области, показывают возможность применения плёнок в качестве управляемых СВЧ-экранов или полосковых линий. Во всей исследованной полосе частот (0 – 20 ГГц) спектр коэффициента S_{21} не имеет особенностей.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 18-33-00519 мол_а) и гранта Президента РФ (проект № МК-3115.2018.3).

ПОДАВЛЕНИЕ ЭФФЕКТОВ ВТОРИЧНОЙ ДИФРАКЦИИ В ПЛОСКОСТИ, КАСАТЕЛЬНОЙ К ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛАСТИНЫ

И.И. Краснолобов, А.М. Лебедев, И.А. Селин, В.Н. Семененко,

Т.А. Фурманова

ИТПЭ РАН

Влияние дифракционных эффектов на обратное рассеяние оценивается по отклонению диаграммы обратного рассеяния (ДОР) от соответствующей диаграммы, вычисленной в приближении физической оптики (ФО), либо в приближении физической теории дифракции (ФТД). Фактическое обратное рассеяние металлической пластиной соответствует вычисленному в приближении ФО лишь в угловых интервалах до 15-30 градусов от нормали к пластине. При дальнейшем росте угла между направлением визирования и нормалью роль дифракционных эффектов последовательно возрастает, что проявляется в переходе от осцилляций фактической диаграммы около ДОР, рассчитанной по ФО, к доминированию дифракционных эффектов при формировании поля обратного рассеяния в направлениях, близких к скользящему вдоль пластины. В отличие от этого, вклад ФО токов на пластине в обратное рассеяние стремится к нулю при приближении направления визирования к скользящему.

При первичной дифракции электромагнитной волны на краях пластины возникают поверхностные токи и рёберные волны. Эффекты вторичной дифракции формируются в результате набегания поверхностных токов на края пластины и рёберных волн на её вершины.

ФТД правильно описывает эффекты первичной дифракции на краях тонкой пластины. Поэтому ДОР такой пластины, рассчитанная по ФТД, хорошо приближает фактическую ДОР для направлений, характеризующихся углом с нормалью до 60-75 градусов. С дальнейшим увеличением угла с нормалью и вплоть до скользящего падения вклад явлений вторичной дифракции в обратное рассеяние растёт: у фактической ДОР наблюдаются всё более сильные осцилляции по сравнению с ДОР, рассчитанной по ФТД, переходящие в заметные расхождения средних уровней ЭПР. Наконец, в плоскости, касательной к поверхности пластины, вторичная дифракция существенно меняет уровень ЭПР, по сравнению с расчётом по ФТД, всюду, кроме малых угловых окрестностей направлений, перпендикулярных краям пластины.

Результаты, полученные в данной работе, показывают возможность подавления эффектов вторичной дифракции непосредственно в плоскости, касательной к поверхности пластины. Результат достигается нанесением тонких цилиндров из радиопоглощающего покрытия (РПП) вдоль краёв

пластины. При маскировке отдельных рёбер наблюдается приближение фактической диаграммы к ДОР, рассчитанной по ФТД, в больших секторах углов, центрированных около направлений, перпендикулярных краям пластины. Подавление эффектов вторичной дифракции и выход ЭПР на уровни, получающиеся при расчёте по ФТД, проявляется как значительное снижение ЭПР в широкой угловой окрестности главных максимумов ДОР.

Для 4-угольной металлической пластины, имеющей острый угол между двумя длинными боковыми сторонами, в плоскости, касательной к поверхности пластины, и в измерениях, и при расчёте ДОР был получен значительный максимум обратного рассеяния в направлении, приблизительно соответствующем биссектрисе острого угла. При этом направление на максимум далеко отстояло от направлений нормалей ко всем сторонам пластины. Было показано, что наблюдавшийся локальный максимум ЭПР формируется рёберными волнами вдоль указанных боковых сторон и устраняется нанесением цилиндров РПП вдоль этих сторон.

В настоящее время ведётся отработка технологичных способов нанесения небольших объёмов РПП вдоль тонких краёв пластин и других конструктивных элементов для подавления рёберных волн и устранения соответствующих дифракционных эффектов. Это позволит улучшить точность измерений ДОР элементов, помещаемых на металлическую пластину, а также станет полезным приёмом при решении многих прикладных задач.

**ВОЗБУЖДЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА
С ПОМОЩЬЮ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЁТКИ, ПОМЕЩЁННОЙ
НА ПОВЕРХНОСТЬ ВОЛНОВОДА**

А.М. Лебедев¹, М.Л. Обухов²

¹ИТПЭ РАН

²МФТИ (ГУ)

Исследуется принципиальная возможность перевода энергии падающей электромагнитной волны в энергию собственной волны диэлектрического волновода на металлической подложке. Для передачи энергии между электромагнитными волнами (ЭМВ) разной структуры используется дифракционная решётка. В данной работе полагается, что диэлектрик имеет потери, дифракционная решётка находится на поверхности волновода и состоит из брусков малого поперечного сечения из того же диэлектрика, а ЭМВ падает по нормали к поверхности волновода.

В работе решалась задача получения согласованной комбинации нескольких физических явлений. Во-первых, для собственной волны диэлектрического волновода с потерями из численного решения дисперсионного уравнения была найдена комплексная постоянная распространения, после чего определена длина волны. Во-вторых, период дифракционной решётки был взят равным длине собственной волны диэлектрического волновода. Тогда волна, соответствующая первому дифракционному максимуму решётки, проходит в диэлектрик под тем же углом, под которым в объёме диэлектрика движутся волновые фронты, формирующие собственную волну волновода. Наконец, в-третьих, запираение ЭМВ в слое диэлектрика (а не выход волны из диэлектрика в результате излучения той же дифракционной решётки во внешнюю область) получаем, образуя резонатор на основе диэлектрического волновода, вводя металлические стенки по торцам волновода и выбирая расстояние между стенками, кратное длине волны в волноводе. Тогда накопление энергии в диэлектрическом резонаторе становится энергетически выгодным. Изменяя уровень потерь в диэлектрике, можно управлять как энергетической ёмкостью резонатора, так и полосой частот, в которой наблюдается заметный эффект накопления энергии в объёме диэлектрика.

В численном эксперименте получено уменьшение обратного рассеяния от слоя диэлектрика, лежащего на подложке и имеющего дифракционную решётку на поверхности, на порядок и более по сравнению со случаем отсутствия дифракционной решётки.

Аналогичный эффект резонансного поглощения энергии ЭМВ под рупорной антенной, нагруженной на плоский образец материала на

металлической подложке, проявляющийся как уменьшение коэффициента отражения от рупора в питающем волноводе, ранее был подробно исследован численно, а также неоднократно наблюдался в практике измерений электродинамических параметров материалов.

НЕКОТОРЫЕ СПОСОБЫ ХАОТИЗАЦИИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ В ПОЛОСТИ С БОЛЬШИМ ВХОДОМ

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

ИТПЭ РАН

Рассматриваются металлические полости с размерами много больше длины волны λ , без диссипации, с большим входом. Последнее означает, что характерные размеры полости по входу и по глубине сопоставимы.

Исследовались возможности дополнительной хаотизации распространения электромагнитной волны (ЭМВ) во внутренней области для двух типов полостей: рупорных, характеризующихся существенным сужением поперечного сечения при удалении от входа, и в виде бочки, имеющих приблизительно постоянное поперечное сечение по глубине. Здесь для таких полостей бралось круглое поперечное сечение и плоское дно, перпендикулярное боковой поверхности и параллельное плоскости входа.

Обратное рассеяние наглядно характеризует хаотизацию ЭМВ в полости: по уменьшению ЭПР можно судить об увеличении степени хаотизации. В пределе упорядоченного распространения можно ожидать достижения ЭПР значительных значений порядка $\sigma \sim 4\pi \cdot S^2 / \lambda^2 \gg S$, поскольку в принятых условиях $S \gg \lambda^2$; здесь S - площадь входного отверстия полости. Для рупорной полости, как и для острого двугранного уголка, при некоторых направлениях облучения на выходе полости может сформироваться эффективная синфазная апертура, излучающая волну в обратном или близком к обратному направлению, при площади эффективной апертуры порядка S . Для полости типа "бочка" значительная синфазная, излучающая назад апертура с площадью порядка S получается при облучении в направлении, перпендикулярном дну полости. Нарушение упорядоченности распространения ЭМВ приводит к уменьшению ЭПР, хотя достичь нижнего предела по ЭПР $\sigma \sim S$ [1], указывающего на очень высокую степень хаотизации, для полости с широким входом практически невозможно. Достоинством конструктивных приёмов, приводящих к хаотизации распространения ЭМВ в полости, является их действенность в широкой полосе частот.

Численно исследовались варианты введения выемок и выступов на боковых поверхностях полостей для увеличения степени хаотизации. Эффективность некоторых вариантов была подтверждена экспериментально.

Указанные выше виды неоднородностей на стенках полостей обоих типов вводились по следующим правилам. Во-первых, в угловой области, где предполагается наблюдать уменьшение ЭПР вследствие дополнительной

хаотизации, собственный вклад неоднородностей в обратное рассеяние полостью должен быть мал. Во-вторых, для волн, формирующихся вследствие рупорного запираения, либо отражения от дна полости и бегущих назад, к входу в полость, неоднородности должны пересекать поверхностные токи, связанные с этими ЭМВ. В результате неоднородности будут переизлучать и тем самым увеличивать хаотизацию распространения ЭМВ в полости.

Дополнительно были исследованы возможности увеличения хаотизации путём перехода с круглой на звёздчатую форму поперечного сечения полости.

МЕТОД СНЕСЕНИЯ ГРАНИЧНОГО УСЛОВИЯ В ЗАДАЧАХ РАССЕЙЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН НА ОБЪЕКТАХ МАЛОЙ ТОЛЩИНЫ

С.Н. Фетисов¹, А.В. Сету́ха²

¹ОКБ им. А. Люльки

²МГУ им. М.В. Ломоносова,

Факультет вычислительной математики и кибернетики

Рассматривается трёхмерная задача рассеяния электромагнитных волн на идеально проводящих объектах малой толщины (один из габаритных размеров много меньше остальных).

Разработан численный метод, основанный на снесении граничного условия на срединную поверхность и позволяющий учесть телесность исходного объекта при решении задачи на тонком экране. В предложенном методе ставится новая краевая задача в области вне тонкого экрана. Далее задача сводится к решению двух интегро-дифференциальных уравнения на тонком экране.

Разработана численная схема решения, основанная на методе коллокаций с использованием кусочно-постоянных аппроксимаций. При аппроксимации интегральных операторов используются ранее разработанные квадратурные формулы [1]. В отличие от метода граничных интегральных уравнений [2] разработанная схема не вырождается при стремлении толщины объекта к нулю.

Проведено тестирование метода, показавшее хорошее соответствие численных результатов с экспериментальными данными (см. рис. 1). В качестве исследуемых объектов были использованы крылья конечного размаха с аэродинамическими профилями NACA0012 с $C_{\max} = \{0\%, 5\%, 25\%\}$.

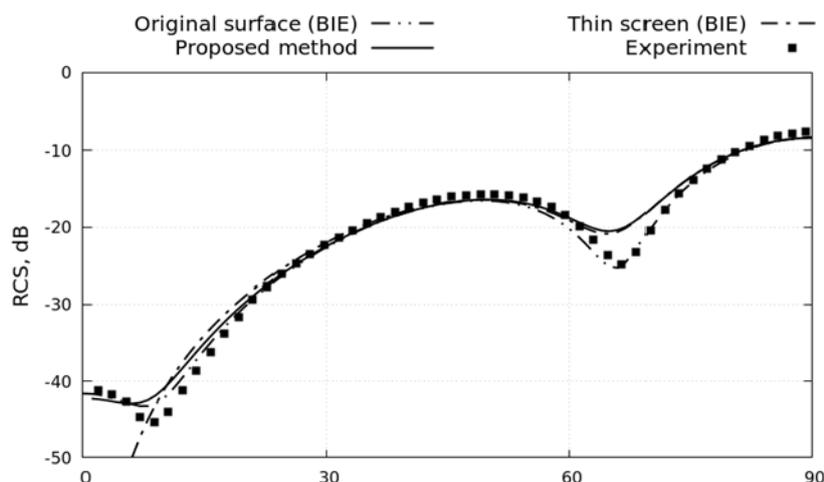


Рис. 1. ДОР, полученные разными методами, в сравнении с экспериментальными данными

ЛИТЕРАТУРА

[1] Захаров Е. В., Сетуха А. В., Безобразова Е. Н. Метод гиперсингулярных интегральных уравнений в трехмерной задаче дифракции электромагнитных волн на кусочно-однородном диэлектрическом теле // Дифференциальные уравнения. – 2015. – Т. 51, № 9. – С. 1206–1219.

[2] Захаров Е. В., Рыжаков Г. В., Сетуха А. В. Численное решение трехмерных задач дифракции электромагнитных волн на системе идеальнопроводящих поверхностей методом гиперсингулярных интегральных уравнений // Дифференциальные уравнения. – 2014. – Т. 50, № 9. – С. 1253–1263.

О ПРИМЕНЕНИИ МИКРОПОЛОСКОВЫХ СШП ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ В СОСТАВЕ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

Г.И. Абдрахманова, И.Л. Виноградова, Е.П. Грахова

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет»

Представлена антенная решетка (АР), которая состоит из 16 микрополосковых СШП излучателей, СВЧ тракта, монтажного стола с изменяемым положением посадочных мест для излучателей (см. рис. 1). Рабочая область АР представляет собой матрицу размером 4×4 элемента, которые расположены в 16 каретках. Они, в свою очередь, установлены на подвижных направляющих, которые за счет перемещения позволяют изменять расстояние между элементами и формировать различные формы диаграммы направленности АР.

В состав СВЧ тракта входят: генератор сигналов, источник питания, один делитель на 2 канала и два делителя на 8 каналов, два усилителя мощности, 16 согласованных нагрузок (для отключения отдельных излучателей). Вход СВЧ тракта – SMA (розетка), входная мощность – не более 10 мВт, выходная мощность каждого СВЧ выхода – не более 0,1 мВт. Делители имеют развязку между каналами не менее 15 дБ, поэтому дополнительное оборудование (вентили) не требуется. С задней стороны монтажного стола расположен радиопоглощающий материал высотой не более 120 мм, коэффициент отражения которого не хуже -15 дБ.

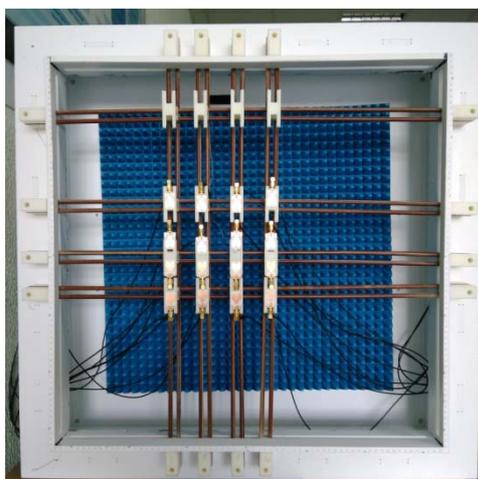


Рис. 1. Внешний вид АР

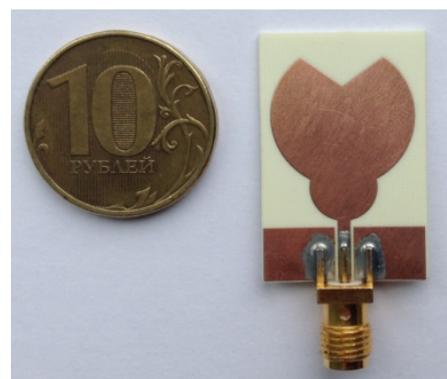


Рис. 2. Внешний вид излучателя

Излучатели изготовлены на основе армированного материала на основе термореактивного полимера с добавлением керамики Rogers RO4350B и соответствуют 5 классу точности по ГОСТ Р 53429-2009 (см. рис. 2). Диапазон рабочих частот согласно измерениям – $2,9 \div 15$ ГГц.

Применение указанных излучателей обеспечивает широкополосность AP и малые размеры, а возможность изменения расстояний между ними – управление формой диаграммы направленности (у одиночных излучателей она – всенаправленная).

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам (Конкурс СП-2018).

МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ ЛЕПЕСТКА СВЧ-РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ С ЗАДАННЫМ ВРЕМЯ-ЧАСТОТНЫМ ПАРАМЕТРОМ

И.Л. Виноградова¹, А.Х. Султанов¹, А.В. Воронкова¹, Г.И. Абдрахманова¹,
Е.П. Грахова¹, И.К. Мешков¹, Л.З. Янтилина¹

ФГБОУ ВО «УГАТУ»

Предложен метод и выполнена лабораторно-стендовая апробация формирования направленного СВЧ-радиоизлучения в диапазонах частот $\Delta F_1 = 1...10$ ГГц и $\Delta F_2 = 75...110$ ГГц с применением радиоизлучающей упорядоченной 3D-структуры (3D-ФАР), элементы которой запитывались из волоконно-оптических трактов, рис. 1. Формирование параметров оптических сигналов производилось единым функциональным оптическим устройством управления (ОУУ) [1]. Использовались сверхширокополосные балансные фотодетекторы.

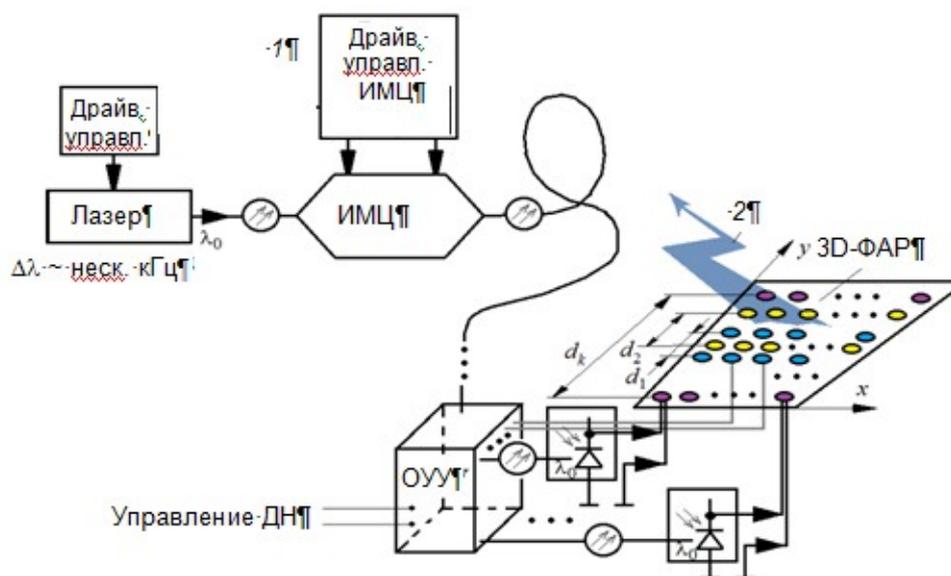


Рис. 1. Схема волоконно-оптического формирователя с излучающей 3D-ФАР:
1 – входной модулирующий сигнал; 2 – лепесток радиоизлучения 3D-ФАР

Установлено, что генерируемый ОУУ время-частотный параметр оптических сигналов квазилинейно передается в радиотракт, что позволяет использовать его, например, в качестве скрытой информационной метки, и не применяется в системах традиционной связи.

ШИРОКОПОЛОСНАЯ ПОЛИКОНИЧЕСКАЯ ВИБРАТОРНАЯ АНТЕННА С МАГНИТНЫМ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИМ МАТЕРИАЛОМ

В.Н. Семенов¹, К.М. Басков¹, Д.И. Акимов¹, А.А. Политико¹,
В.А. Чистяев¹, Н.И. Бобков², И.И. Краснолобов¹

¹ИТПЭ РАН

²АО ВНИИ «Градиент»

В связи с развитием систем широкополосной радиосвязи и мониторинга электромагнитной обстановки актуальной задачей является разработка излучателей, формирующих ненаправленное излучение в азимутальной плоскости в полосе частот шириной в несколько октав. Одной из распространенных сверхширокополосных антенн, применяемых в системах связи и мониторинга, является биконический вибратор с точкой питания в вершинах конусов [1-2]. Использование вибраторной антенны поликонической формы, образующей которой является ломаная линия, позволяет не только уменьшить ее геометрические размеры, но и сохранить достаточно широкую диаграмму направленности (ДН) в вертикальной плоскости в высокочастотной области полосы рабочих частот [3]. Наиболее часто для установки биконических вибраторов в составе кольцевой антенной решетки радиомониторинга применяются кронштейны в виде радиальных металлических труб. Такой способ установки имеет ряд недостатков, из которых наиболее значимыми являются: 1) симметрирующие устройства ограничивают полосу рабочих частот; 2) диэлектрические корпуса-держатели и трубы искажают как амплитудные, так и фазовые ДН вибраторов, особенно в высокочастотной области полосы частот.

Свободным от указанных недостатков является несимметричный поликонический вибратор, установленный на вертикальном стержне, как показано на рис. 1. Различие в размерах и конфигурации верхнего и нижнего конусов обусловлено необходимостью подъема максимума ДН в вертикальной плоскости при сохранении ее ширины не менее 30° в полосе рабочих частот от 0,3 до 6 ГГц [4].

К недостаткам такого способа установки в первую очередь следует отнести высокий уровень токов, наводимых на стержне, особенно в области нижних частот, которые возбуждают поля, интерферирующие с полем излучения вибратора, искажая его ДН. Для устранения указанного эффекта целесообразно использовать современные радиопоглощающие материалы (РПМ), наносимые пневматическим способом.

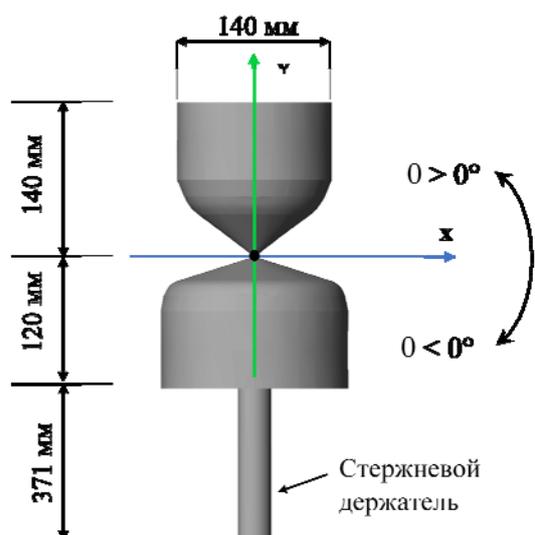


Рис. 1. Исследуемая несимметричная поликоническая вибраторная антенна.

Предлагается использовать РПМ, изготовленный на основе кремнийорганического связующего, наполненного крупнодисперсным магнитомягким порошком из поликристаллического металлического сплава и обладающий высокими магнитными потерями в метровом и дециметровом диапазонах длин волн. Измерение частотной зависимости диэлектрической и магнитной проницаемости РПМ проводилось двумя методами: в коаксиальной измерительной

ячейке в диапазоне от 0,1 до 3,0 ГГц и в свободном пространстве с использованием диафрагмы [6] в диапазоне частот от 3,0 до 10 ГГц. Максимум магнитных потерь наблюдается на частоте 190 МГц. Стоит отметить ещё одно свойство этого РПМ, а именно, в рабочем диапазоне частот он обладает высокой диэлектрической проницаемостью наряду с низкими диэлектрическими потерями, наличие которых существенно снижает радиотехническое качество РПМ. Такие свойства РПМ достигаются специальной технологией производства магнитного наполнителя.

Расчет характеристик излучения и согласования антенны проводился методом моментов с помощью пакета программ электродинамического моделирования FEKO. На рис. 2 показано распределение электрических токов на держателе в исходном виде и с нанесенным РПМ толщиной 5 мм на частоте 250 МГц.

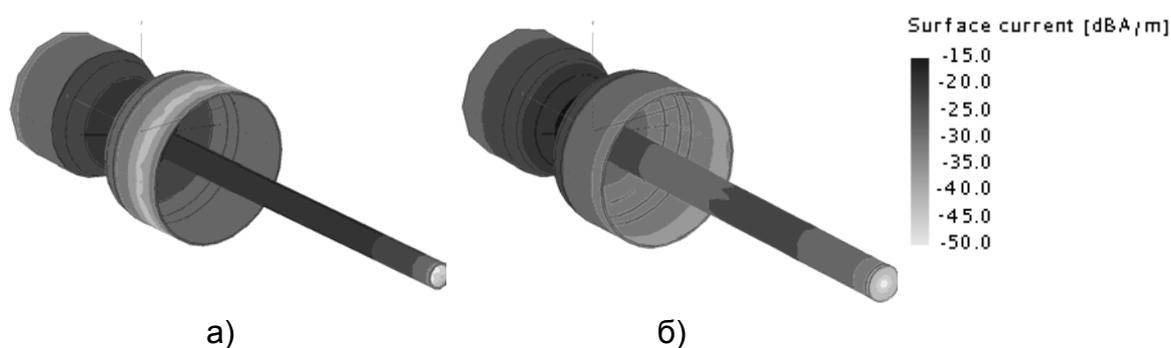


Рис. 2. Распределение электрических токов на поверхности стержневого держателя поликонической антенны в исходном виде (а) и с РПМ на держателе (б) на частоте 250 МГц.

Проведённые исследования показали, что для широкополосных антенных систем средств связи и радиомониторинга целесообразно применение несимметричных поликонических вибраторов, устанавливаемых вертикально на стержневом металлическом держателе. Применение разработанного в ИТПЭ РАН магнитного РПМ с высокими магнитными потерями в метровом и дециметровом диапазонах длин волн способствует эффективному подавлению токов, наводимых на держателе, что позволяет формировать более равномерные ДН антенны в вертикальной плоскости, снизить КСВН антенны в области низких частот и тем самым существенно расширить диапазон рабочих частот.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *C.E. Baum, A.P. Stone, J.S. Tyo, Ultra-Wideband Short-Pulse Electromagnetics 8, Springer, 2007.*
- [2] *A.T. Ott, T.F. Eibert. A 433 MHz – 22 GHz reconfigurable dielectric loaded biconical antenna // Conf. Proc. of the 4th European Conf. on Antennas and Propagation, 12–16 April 2010, Barcelona, Spain.*
- [3] *В.А. Калошин, Е.А. Скородумова. Исследование симметричной поликонической антенны // Труды IV Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь», Москва, 29 ноября – 3 декабря 2010, т. 1, с. 531.*
- [4] *Н.И. Бобков, Ю.В. Юханов, А.И. Семенухин, Д.В. Семенухина. Широкополосные проходные вращатели поляризации и примеры их применения в апертурах антенн // Антенны. - 2010. - №2. - С. 31-37.*
- [5] *К.М. Басков, А.А. Политико, В.Н. Семенов, В.А. Чистяев. Коррекция S-параметров при измерении материальных параметров магнитодиэлектрических композитов в свободном пространстве с применением диафрагмы // «Журнал радиоэлектроники». 2017. №5. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/may17/7/text.pdf>.*

СВЧ-СПЕКТРЫ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ КАРБОНИЛЬНОГО ЖЕЛЕЗА

В.А. Гаранов, С.Г. Кибец, А.А. Политико, В.Н. Семенов, В.А. Чистяев
ИТПЭ РАН

Исследованы частотные зависимости диэлектрической и магнитной проницаемостей композиционных материалов, изготовленных из кремнийорганического связующего и наполненных мелкодисперсным порошком карбонильного железа в сверхширокой полосе частот по методикам [1-2]. Получены частотные зависимости диэлектрической проницаемости композитов на основе карбонильного железа методом свободного пространства в диапазоне 3-39 ГГц. Спектры магнитной проницаемости композитов измерены двумя различными методами в перекрывающихся частотных поддиапазонах – в свободном пространстве (поддиапазон 3-39 ГГц) и в коаксиальной измерительной ячейке (поддиапазон 0,2-5 ГГц).

Исследована концентрационная зависимость эффективных диэлектрической и магнитной проницаемости композитов с наполнителем в виде карбонильного фосфатированного железа марки Р-100Ф-2 (средний размер частиц порошка 2 мкм) производства ООО «Синтез-ПКЖ».

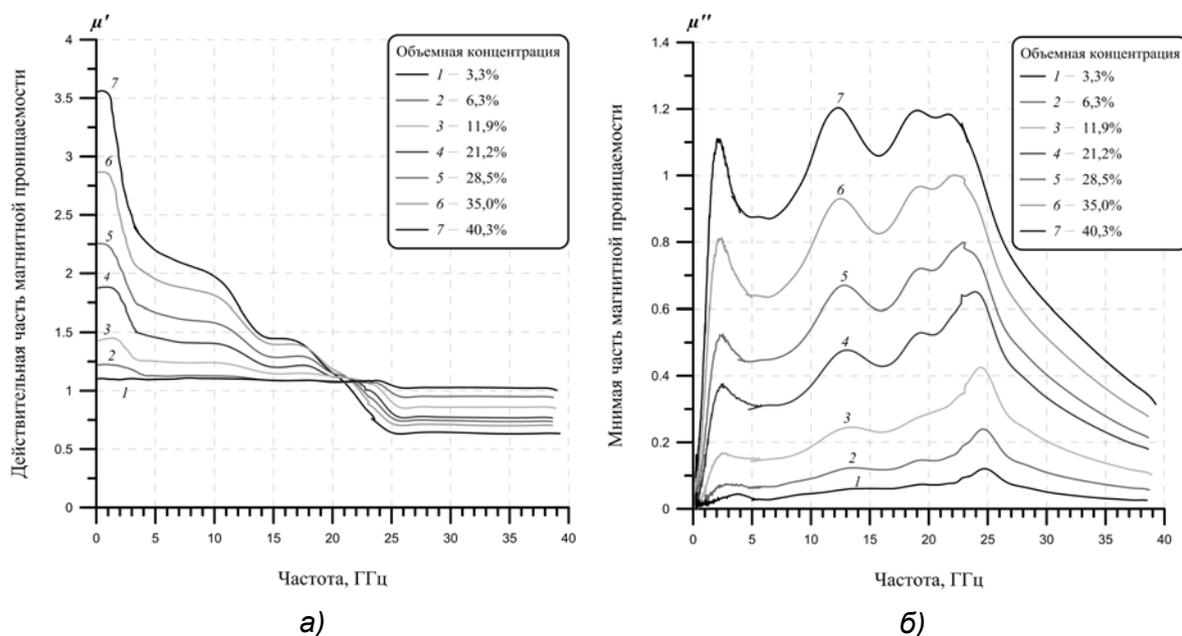


Рис. 1. Частотные зависимости действительной (а) и мнимой части (б) части магнитной проницаемости композитов при различных концентрациях наполнителя Р-100Ф-2

Спектр магнитной проницаемости таких композитов (рис. 1) имеет сложную многомодовую структуру, являющуюся суперпозицией дебаевской релаксации магнитных доменных границ и нескольких высокочастотных спиновых обменных резонансов. При этом зависимость амплитуд магнитных резонансов разных порядков от концентрации наполнителя имеет сложный нелинейный вид.

Показано, что относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости композитов логарифмически возрастают с ростом объемного наполнения железа, что соответствует закону Лихтенеккера [3] для смеси из двух компонентов и косвенным образом подтверждает достоверность полученных результатов.

Исследованные зависимости материальных параметров таких композитов позволяют понять сложную структуру магнитных спектров композиционных материалов на основе карбонильного железа.

В заключение продемонстрировано, что на основе карбонильного железа типа Р-100Ф-2 можно разработать и создать однослойные радиопоглощающие покрытия резонансного типа сравнительно небольшой толщины (не более 1,5 мм) с глубоким минимумом коэффициента отражения на металлической подложке (менее минус 40 дБ). Варьируя концентрацию наполнителя в полимерном связующем, можно смещать положение минимума коэффициента отражения по частоте в широком диапазоне от 10 до 28 ГГц. Такие покрытия являются перспективным направлением разработки, направленным на обеспечение электромагнитной совместимости радиоэлектронного оборудования различного назначения.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Басков К.М., Политико А.А., Семенов В.Н., Чистяев В.А. Коррекция S-параметров при измерении материальных параметров магнитодиэлектрических композитов в свободном пространстве с применением диафрагмы // «Журнал радиоэлектроники». 2017. №5. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/may17/7/text.pdf>
- [2] Розанов К.Н., Симонов Н.А., Осипов А.В. Измерение магнитной проницаемости ферромагнитных пленок на сверхвысоких частотах. РЭ.2002. Т. 47. № 2. С. 229-338.
- [3] R. Simpkin. Derivation of Lichtenecker's Logarithmic Mixture Formula From Maxwell's Equations. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 58, pp. 545-550, Mar. 2010.

ЭКРАНИРУЮЩИЙ КОЛПАК С РАДИОПОГЛОЩАЮЩИМ МЕТАМАТЕРИАЛОМ

В.Н. Семенов, К.М. Басков, Д.И. Акимов, А.А. Политико,

И.И. Краснолобов

ИТПЭ РАН

Одно из перспективных направлений в развитии антенной техники связано с достижениями в области создания так называемых метаматериалов, композиционных материалов с необычными физическими свойствами [1]. Особенность данных материалов обусловлена резонансным взаимодействием электромагнитной волны, распространяющейся в среде, наполненной элементами определенной формы и размера, обеспечивающими резонансное возбуждение токов в этих элементах. Одно из первых упоминаний в литературе об использовании метаматериалов в качестве радиопоглотителей имеется в [2]. Резонансные элементы могут быть самых разных форм, например, выполнены из смеси проволок разного размера, комбинаций разорванных колец или проводов, скрученных в спирали [3-5]. В данной работе обращено внимание на исследование в полосе частот 200...400 МГц метаматериала, состоящего из резонансных включений в виде проволочных изолированных колец со скрученными концами (рис. 1). Исследования проводились как численно методом интегральных уравнений с использованием периодических граничных условий, так и на опытном образце.

Для проверки возможного использования метаматериала для поглощения энергии электромагнитного поля были проведены расчеты коэффициента стоячей волны (КСВ) четвертьволновой вибраторной антенны с частотой настройки 300 МГц, укрытой металлическим цилиндром. Были проведены расчеты КСВ антенны, излучающей в свободное пространство, и КСВ антенны, укрытой металлическим цилиндром с метаматериалом (рис. 2). Результаты расчетов показали, что КСВ антенны, укрытой цилиндром с метаматериалом, на частоте настройки становится равным 1,85. Это позволяет заключить, что метаматериал из резонансных элементов в виде колец с емкостной нагрузкой может быть использован в качестве поглощающего материала. Следует отметить, что КСВ антенны, укрытой металлическим цилиндром без метаматериала, стремится к бесконечности в исследуемом диапазоне частот.

В изготовленном опытном образце исследуемые резонансные элементы метаматериала представляли собой кольца из нихромовой проволоки со скруткой, которая обеспечивала ёмкостную нагрузку. Элементы крепились на радиопрозрачную основу и располагались внутри

экранирующего колпака так же, как в электродинамической модели. Применение метаматериала позволило получить значение КСВ антенны не выше двух в полосе частот 290...315 МГц. Результаты экспериментов показали, что влияние метаматериала на остальные радиотехнические характеристики экранирующего колпака незначительно.



Рис. 1. Фотография резонансного кольца – элемента метаматериала

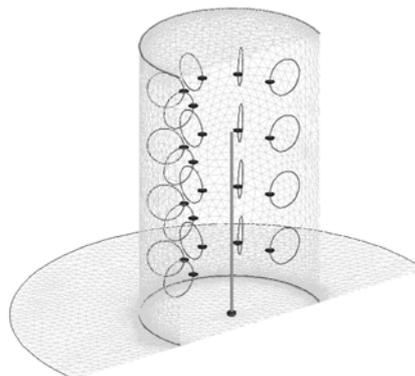


Рис. 2. Экранирующий колпак с метаматериалом, установленным на антенну

ЛИТЕРАТУРА

- [1] V.G. Veselago. Electrodynamics of substances with simultaneously negative electrical and magnetic permeabilities // Soviet Physics Uspekhi, vol. 10, no 4, pp. 509 - 514, 1968.
- [2] S.A. Kuehl, S.S. Grove, A.G. Smith and I.P. Theron. Manufacture of microwave chiral materials and their electromagnetic properties // Conf. Proc. of the CHIRAL'95 International Conference, – The Pennsylvania State University, 1995.
- [3] М.В. Костин, В.В. Шевченко. Теория искусственных магнетиков на основе кольцевых токов // Радиотехника и электроника, – М.: 1992. – № 11.
- [4] A.N. Lagarkov, V.N. Semenenko, V.A. Chistyayev et al. Resonance Properties of Bi-Helix Media at Microwaves // Electromagnetics, vol. 17, no 3, p. 213, 1997.
- [5] V.N. Semenenko, V.A. Chistyayev, D.E. Ryabov. Electromagnetic properties of Composite Magnetic Material in Dependence on Inclusion Concentration // Proceedings of the "Bianisotropics'97" International Conference and Workshop on Electromagnetics of Complex Media, – Glasgow, 1997 – pp. 285 - 288.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СИНТЕЗА ЗЕРКАЛЬНОГО КОЛЛИМАТОРА МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Ф.Б. Хлебников¹, Д.А. Коняев^{1,2}, Н.Е. Шапкина^{1,2}

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

²ИТПЭ РАН

Применение коллиматоров позволяет проводить эксперименты по дифракции и рассеянию плоской электромагнитной волны на объектах сложной формы внутри безэховой камеры, лишенной практически всех недостатков открытых полигонов, существенно повышая при этом точность измерений и снижая их стоимость. Наиболее распространены зеркальные коллиматоры, выполненные в виде несимметричной вырезки параболоида вращения, в фокусе которого находится источник излучения.

В работе рассматривается задача синтеза оптимальной формы коллиматора со скругленными краями на примере модели протяженного цилиндрического зеркала с сечением в виде отрезка параболы, дополненного краевыми скруглениями и замыкающей дугой окружности в теневой области.

В работе решается скалярная задача дифракции на двумерном зеркале, облучаемом точечным источником. В качестве функционала задачи синтеза используется сеточная S -норма отклонения получаемого поля от поля плоской волны. Параметрами функционала служат геометрические размеры скругления и свойства радиопоглощающего покрытия, а также параметры его нанесения.

Основным методом решения прямой задачи дифракции на коллиматоре является метод интегральных уравнений. Полученные интегральные уравнения численно решаются при помощи метода Крылова-Боголюбова. Для минимизации функционала обратной задачи используется метод Нелдера-Мида.

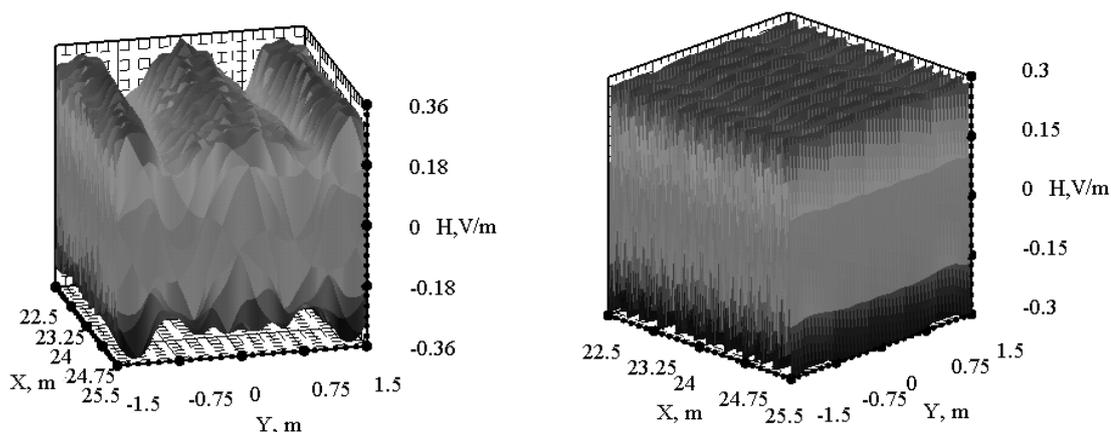


Рис. 1. Поле в рабочей зоне коллиматора. Справа – коллиматор с улучшенными параметрами, полученными в результате оптимизации. В качестве параметров коллиматора слева взято одно из начальных приближений.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Н.П. Балабуха, А.С. Зубов, В.С. Солосин.* Компактные полигоны для измерения характеристик рассеяния объектов. М.: Наука, 2007.
- [2] *Gupta I., Ericson K., Burnside W.* A method to design blended rolled edges for compact range reflectors IEEE Transactions on antennas and propagation, vol. 38, no.6. June 1990.
- [3] *А.Г. Свешников, И.Е. Могилевский.* Математические задачи теории дифракции. – М.: Физический факультет МГУ, 2010.
- [4] Mathematical modeling of mirror collimator with impedance rolled edges / *Ф.Б. Хлебников, Д. А. Коняев, Н. Е. Шапкина, В. В. Ровенко* // Abstracts of Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS). St. Petersburg, Russia. May 22–25, 2017. — 2017. — P. 825–825.

РУПОРНЫЙ ОБЛУЧАТЕЛЬ СО СПЕЦИАЛЬНОЙ ДИАГРАММОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ

Н.П. Балабуха, Н.Л. Меньших

ИТПЭ РАН

Одним из важнейших параметров измерительного комплекса для проведения исследований характеристик рассеяния и излучения объектов является отличие падающего на объект поля от поля плоской волны. Использование облучателей со специальной диаграммой направленности (ДН) помогает получить более равномерное поле в рабочей зоне безэховой камеры.

В ДН рупорных облучателей с изломом образующей есть область с примерно постоянным значением амплитуды, так называемая «полочка». Такой облучатель позволяет заметно расширить рабочую зону, т.е. исследовать объекты больших размеров. Однако, у обычного конического рупора с изломом образующей «полочки» в плоскостях Е и Н формируются на разных частотах, что существенно уменьшает возможности по расширению рабочей зоны безэховой камеры.

В данной работе предложен рупор, состоящий из двух эллиптических конусов. При соотношении осей эллипса порядка 4:3 распределения поля в главных осях становятся близки друг к другу, т.е. в некотором диапазоне частот есть область с примерно постоянным распределением амплитуды поля одновременно в Е и в Н плоскостях. Причем область, в которой неравномерность амплитуды поля меньше 1 дБ в рабочей зоне, составляет $\pm 14\%$ от центральной частоты, что достаточно неплохо для рупорных облучателей. На рисунке 2 приведены ДН для центральной частоты диапазона.

Если выполнить еще дополнительно скос апертуры рупора для получения несимметричности ДН в вертикальной плоскости, то с помощью такого облучателя можно увеличить размер рабочей зоны компактного полигона с зеркальным коллиматором. Т.к. зеркало коллиматора представляет собой несимметричную вырезку из параболоида вращения [1], то расстояние от облучателя до верхней кромки больше, чем до нижней. Потому несимметричность ДН позволит обеспечить более равномерное поле на зеркале в области, соответствующей рабочей зоне.

На рисунках 3 и 4 представлены результаты расчета поля в рабочей зоне компактного полигона ИТПЭ РАН с зеркалом МАК-12 при использовании в качестве облучателя стандартного рупора и расфазированного рупора.

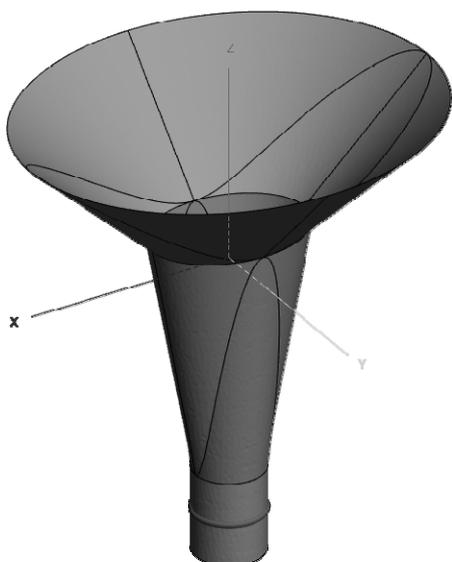


Рис. 1. Общий вид расфазированного эллиптического рупора

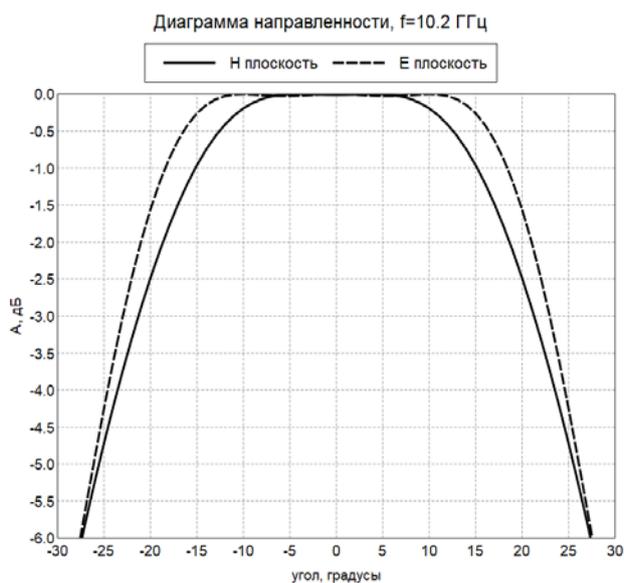


Рис. 2. Распределение поля в главных плоскостях рупора на центральной частоте.

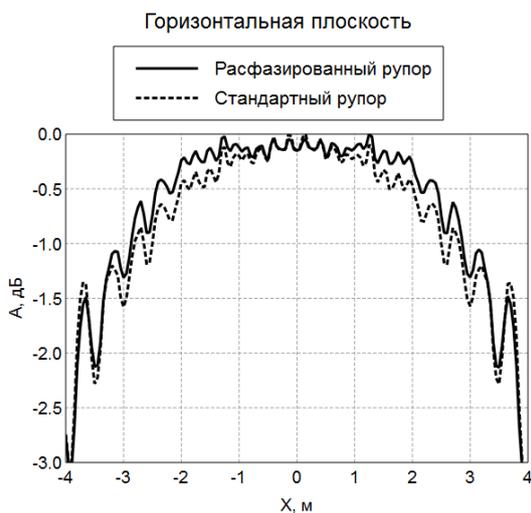


Рис. 3. Распределение поля в центре рабочей зоне компактного полигона в горизонтальной плоскости, 10 ГГц.

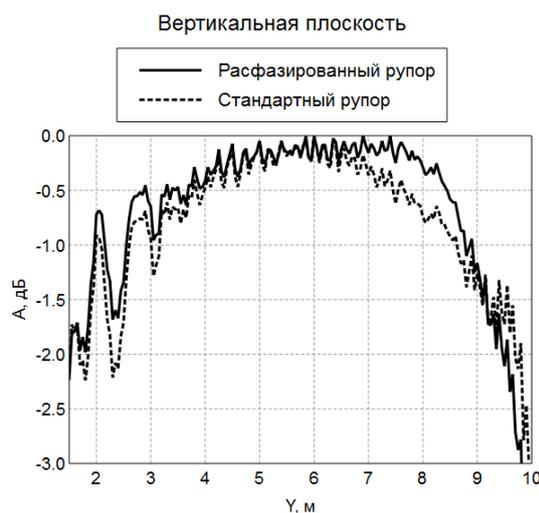


Рис. 4. Распределение поля в центре рабочей зоне компактного полигона в вертикальной плоскости, 10 ГГц.

По результатам расчетов можно видеть перспективность использования подобного облучателя.

ЛИТЕРАТУРА

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

ШИРОКОПОЛОСНЫЙ ОБЛУЧАТЕЛЬ КОЛЛИМАТОРА

Н.П. Балабуха¹, М.Д. Бушкин², А.С. Зубов¹, В.С. Солосин¹

¹ИТПЭ РАН

²МФТИ (ГУ)

Измерительный стенд – компактный полигон, предназначенный для исследования широкого круга радиотехнических характеристик реальных объектов, состоит из коллиматора и облучателей. Облучатель является одним из ключевых элементов, определяющих как степень равномерности распределения поля и, следовательно, точность измерений, так и ширину полосы частот. Оптимизации диаграммы излучения облучателей посвящено множество статей.

В данной работе рассматривается проблема расширения полосы частот. В качестве облучателей были применены широкополосные антенны с коньковым переходом фирмы Satimo SH800 и SH2000, при этом антенна SH2000 была дополнена диэлектрическими вставками для приближении ее диаграммы излучения к требуемой (см. рис. 1)

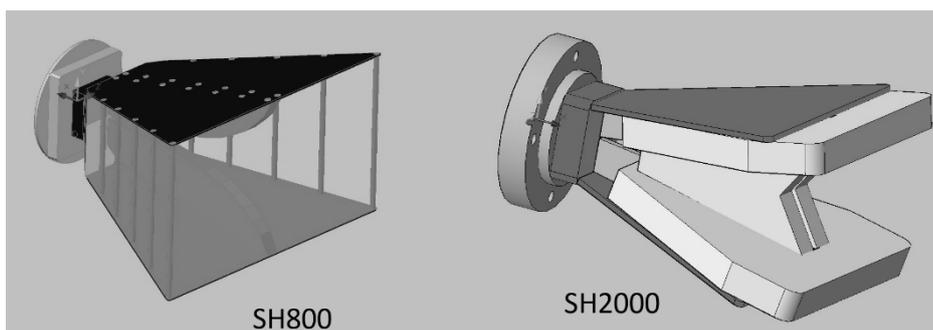


Рис. 1. Общий вид широкополосных антенн.

Антенна SH800 работает в полосе частот 0,8 – 12 ГГц, а SH2000 в полосе частот 2 – 32 ГГц, причем в части диапазона коэффициент усиления и, следовательно, диаграмма излучения мало меняются. Экспериментально установлено, что указанные антенны можно использовать в качестве облучателей коллиматора МАК-5 в диапазонах частот 2 – 6 ГГц (SH800) и 6 – 18 ГГц (SH2000). При этом распределение амплитуды поля в рабочей зоне остается в пределах ± 1 дБ, а фазы – $\pm 10^0$. Таким образом показано, что указанные антенны обеспечивают трехкратное перекрытие по частоте. Учитывая, что стандартные промышленные облучатели обеспечивает перекрытие 1.5, облучатель на базе широкополосных антенн заменяет почти три стандартных облучателя.

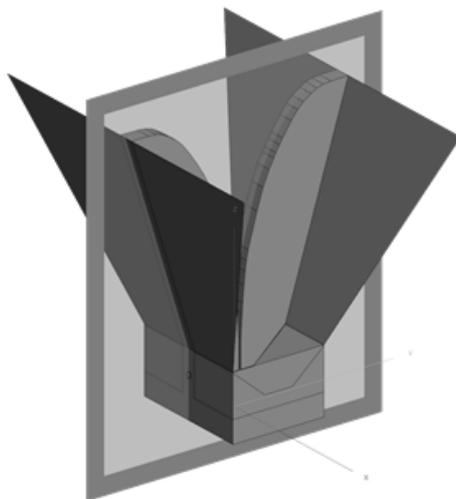


Рис. 2. Модель широкополосного облучателя.

Чтобы изготовить широкополосный облучатель на требуемый диапазон, было выполнено моделирование облучателя (в качестве прототипа использовалась антенна SH2000).

Для исследования использовалась программа электромагнитного моделирования FEKO, с помощью которой были уточнены геометрические размеры антенны и получены основные характеристики (см. рис. 2). Основное внимание было уделено узлу согласования конькового перехода с коаксиальной линией. В результате получены следующие параметры: КСВН в полосе работы облучателя < 2 , коэффициент усиления и диаграммы направленности модельного облучателя и антенны прототипа практически совпадают. Подготовлены чертежи для изготовления облучателя. Для изменения диапазона работы при сохранении диаграммы излучения необходимо пропорционально изменить размеры облучателя. Изменение диаграммы излучения можно обеспечить изменением выходной апертуры антенны. Разработанная программа позволяет выполнить расчет конечных параметров.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *C. Bruns, P. Leuchtmann, R. Vahldieck*, Analysis and Simulation of a 1–18-GHz Broadband Double-Ridged Horn Antenna. *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*, V. 45, No. 1, 2003 p.55-60.
- [2] *Калиничев В.И., Калошин В.А.*, Исследование рупорного излучателя Н-образного сечения // *Журнал радиоэлектроники*, 2007, № 10.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАХОЖДЕНИЯ ДВУХПОЗИЦИОННОЙ ЭПР ПО ПОЛЮ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ

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

¹ИТПЭ РАН

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

Задача нахождения *эффективной поверхности рассеяния* (ЭПР) различного рода тел вызывает большой интерес как в теоретических [1 – 3], так и в практических [4 – 5] исследованиях в связи с проблемами радиолокации [3, 5, 6]. При этом кроме однопозиционных ЭПР [1 – 6], исследователей всё чаще интересуют двухпозиционные ЭПР [1, 3, 4]. Получение диаграмм ЭПР можно проводить различными способами.

Во-первых, для измерения этой характеристики объекта можно использовать открытые полигоны. [3, 5, 6]. *Во-вторых*, это применение компактных полигонов, которые представляют собой специально оборудованные помещения, безэховые камеры (БЭК) относительно небольших размеров, позволяющие измерить необходимые характеристики электромагнитного поля [3, 5, 6]. *В-третьих*, желаемые характеристики можно получить, прибегнув к математическому моделированию рассеяния электромагнитной плоской волны на рассматриваемом объекте. Этот подход позволяет получить данные высокой степени точности [7]. Однако существующих на сегодняшний день вычислительных ресурсов недостаточно для получения диаграмм ЭПР сложных, интересных с практической точки зрения объектов. Поэтому эффективным подходом к получению диаграмм ЭПР является измерение электромагнитного поля в ближней зоне при помощи БЭК и последующее вычисление необходимых полей в дальней зоне средствами математического моделирования [1 – 3].

Для измерения электромагнитного поля в ближней зоне исследуемого объекта в компактных полигонах применяются плоские, цилиндрические или сферические сканеры [7]. По результатам этих измерений рассеянное поле и ЭПР вычисляются с использованием специальных алгоритмов. Такой подход уже много лет применяется при измерении диаграмм направленности антенн [1, 2, 4, 6].

Существует несколько способов пересчёта электромагнитного поля, заданного на цилиндрической поверхности, во внешнюю по отношению к этой поверхности область. *Во-первых*, можно воспользоваться формулами Стреттона-Чу [7, 8], тогда задача сводится к численному интегрированию заданных вектор-функций. Другим вариантом служит разложение поля, заданного на цилиндрической поверхности по цилиндрическим волнам и последующее вычисление полей в дальней зоне [2]. Преимуществом

последнего способа является возможность нахождения поля в дальней зоне лишь по двум компонентам поля, заданным на поверхности.

В данной работе моделируется получение двухпозиционных диаграмм ЭПР при облучении исследуемого объекта квазиплоской волной, формируемой коллиматором, и измерение поля в ближней зоне в случае сканирования по усеченной цилиндрической поверхности в резонансном диапазоне частот на примере дифракции на идеально проводящем конечном цилиндре.

Для нахождения ЭПР объектов, а также электромагнитных полей во всей области, внешней по отношению к объекту, необходимо решить математическую задачу дифракции [7]. В работе для решения такого рода задач и вычисления поля в ближней зоне используется программный комплекс FEKO.

Результаты расчётов демонстрируют, что двухпозиционная диаграмма ЭПР на частотах, близких к резонансным, может быть получена путём пересчёта поля, измеренного в ближней зоне рассеивателя на ограниченном участке цилиндрической поверхности, при отсечении остальной ее части. В большинстве случаев отличие от точных величин максимумов диаграмм ЭПР в секторе углов наблюдения, меньшем на 20-30 град., чем сектор сканирования, не превышает 1-2дБ. Тогда как это расхождение в отдельных случаях может достигать 5-7 дБ. Во всех рассмотренных случаях наблюдается неплохое качественное совпадение с прямыми расчетами в секторе сканирования. Однако без детального исследования измеряемого объекта не представляется возможным заранее предсказать величину диапазона бистатических углов, где двухпозиционная диаграмма ЭПР вычисляется с заданной погрешностью.

Определение двухпозиционной диаграммы ЭПР для всех значений бистатического угла возможно с достаточно высокой точностью, если цилиндрическая поверхность «сканирования» замкнута (полная диаграмма ЭПР в секторе углов 0 – 360 градусов).

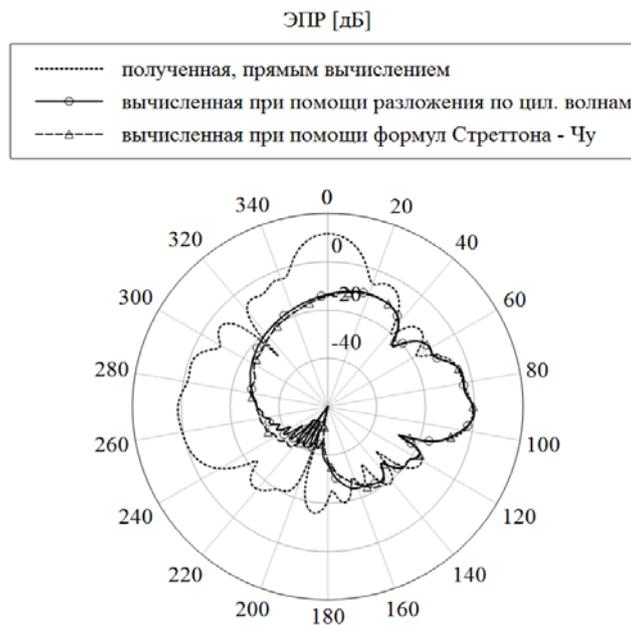


Рис. 1. Пример сравнения диаграмм ЭПР, полученных двумя способами, с диаграммой, вычисленной напрямую программным комплексом ФЕКО

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Hansen T. B. et al. Bistatic RCS calculations from cylindrical near-field measurements – Part I: Theory //IEEE transactions on antennas and propagation. – 2006. – Т. 54. – №. 12. – С. 3846-3856.
- [2] W. M. Leach, “Probe Compensated Near-Field Measurements on a Cylinder” Ph.D. dissertation, School of Electrical Engineering, Georgia Institute of Technology, USA, 1972.
- [3] Knott E. F. Radar cross section measurements. – Springer Science & Business Media, 2012.
- [4] Marr R. A. et al. Bistatic RCS calculations from cylindrical near-field measurements — Part II: Experiments //IEEE transactions on antennas and propagation. – 2006. – Т. 54. – №. 12. – С. 3857-3864.
- [5] Балабуха Н.П., Зубов А. С., Солосин В. С. Компактные полигоны для измерения характеристик рассеяния объектов. – Наука, 2007.
- [6] Бахрах Л.Д. Методы измерений параметров излучающих систем в ближней зоне. – Изд-во "Наука", Ленинградское отд-ние, 1985.
- [7] Ильинский А.С., Кравцов В.В., Свешников А.Г. Математические модели электродинамики [Учеб. пособие для вузов]. – Высш. шк, 1991.
- [8] Дж С. Теория электромагнетизма //М.: Гостехиздат. – 1948. – Т. 1.

МАГНИТНАЯ ФАЗОВАЯ ДИАГРАММА И КВАНТОВЫЕ ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ СИСТЕМАХ

А.М. Белемук¹, Н.М. Щелкачев¹, А.В. Михеенков¹, К.И. Кугель²

¹ИФВД РАН

²ИТПЭ РАН

Ультрахолодные атомы в оптических решётках являются в настоящее время предметом активных экспериментальных и теоретических исследований. Они дают возможность моделировать разнообразные многочастичные системы, в частности, магнитные, и осуществлять проверку соответствующих теоретических моделей, в области параметров трудно реализуемых или даже вообще недостижимых в твёрдом теле.

В рамках этого круга задач мы проанализировали возможные типы магнитного упорядочения в модели взаимодействующих фермионов и бозонов. Гамильтониан такой модели аналогичен гамильтониану Бозе–Хаббарда для двух типов векторных бозонов в оптических решётках.

Продемонстрировано, что такая модель сводится к спин-орбитальной модели (т.н. модели Кугеля–Хомского), активно используемой для описания электронной и спиновой структуры соединений переходных металлов. Здесь, однако, мы имеем дело со случаем спина $S = 1$ и псевдоспина $1/2$. Показано, что взаимосвязь спиновых и псевдоспиновых степеней свободы приводит к весьма нетривиальной фазовой диаграмме, включающей и спин-нематические конфигурации. Управляя параметром, характеризующим взаимодействие частиц в спиновом канале, мы приходим к целому каскаду квантовых фазовых переходов [1]. Также выясняется, что основное состояние системы, характеризуется неоднородным распределением псевдоспина. Введение параметров, характеризующих различие двух типов рассматриваемых частиц, дополнительно разнообразит фазовую диаграмму и расширяет возможности применения изучаемой модели [2].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *A.M. Belemuk, N.M. Chtchelkatchev, A.V. Mikheyenkov, K.I. Kugel, Phys. Rev. B, vol. 96, 2017, P.094435.*
- [2] *A.M. Belemuk, N.M. Chtchelkatchev, A.V. Mikheyenkov, K.I. Kugel, 2018. ArXiv:1802.06236.*

ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ТОПОЛОГИЧЕСКОГО ДИЭЛЕКТРИКА: ВЛИЯНИЕ ГЕКСАГОНАЛЬНЫХ ИСКАЖЕНИЙ

Р.Ш. Акзянов^{1,2}, А.Л. Рахманов¹

¹ИТПЭ РАН

²МФТИ (ГУ)

Исследовано влияние гексагональных искажений на транспортные свойства топологического изолятора. Гамильтониан рассматриваемой системы имеет вид [1]:

$$H = U + v_F(k_x \sigma_y - k_y \sigma_x) + \lambda k_x (k_x^2 - 3k_y^2) \sigma_z + \mathbf{B} \boldsymbol{\sigma},$$

где U – химический потенциал, v_F – скорость Ферми, $\boldsymbol{\sigma} = (\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z)$ – матрицы Паули, λ – параметр, характеризующий гексагональные искажения, \mathbf{B} – магнитное поле, k_i – компоненты импульса электронов. С помощью формализма Кубо рассчитана проводимость топологического изолятора вблизи точки Дирака. Учтено влияние беспорядка, магнитного поля и сдвигового напряжения. Мы показали, что наличие гексагональных искажений существенно влияет на проводимость топологического изолятора. В частности, они приводят к росту продольной проводимости с увеличением беспорядка и анизотропии (аномального) магнитосопротивления в кристаллографической плоскости xy . Гексагональные искажения также влияют на квантовый аномальный эффект Холла и аномальное внеплоскостное магнитосопротивление. Полученные результаты согласуются с экспериментом.

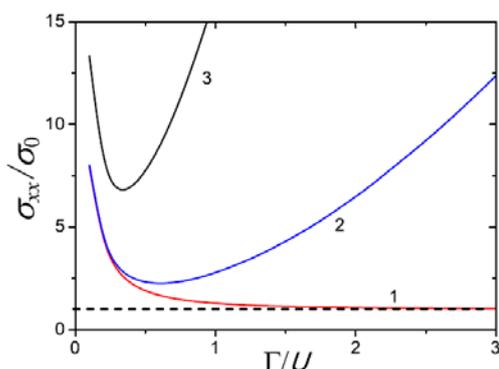


Рис. 1. Зависимость проводимости от степени беспорядка Γ , кривая 1 рассчитана без учета гексагональных искажений, 2 и 3 с их учетом. Магнитное поле отсутствует

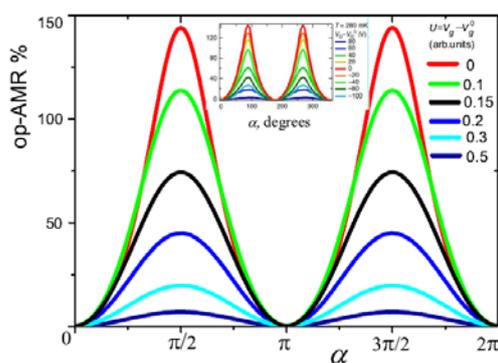


Рис. 2. Зависимость магнитосопротивления от угла между магнитным полем и плоскостью xy образца при различных значениях поперечного напряжения. На врезке показаны данные эксперимента

ЛИТЕРАТУРА

[1] R.S. Akzyanov, A.L. Rakhmanov, Charge conductivity of topological insulator: effect of hexagonal warping, Phys. Rev. B, vol. 97, 2018. id. 075421.

ДИНАМИКА МЕЗОСКОПИЧЕСКОГО АНСАМБЛЯ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ КУБИТОВ, СВЯЗАННЫХ С РЕЗОНАТОРОМ

В.В. Погосов^{1,2}, С.В. Ремизов¹, А.А. Жуков¹, Д.С. Шапиро¹,
Ю.Е. Лозовик^{1,3}

¹Всероссийский НИИ автоматики им. Н. Л. Духова

²ИТПЭ РАН

³Институт спектроскопии РАН

В ряде недавних экспериментальных работ исследовались свойства ансамблей сверхпроводниковых кубитов, связанных с микроволновыми резонаторами. С помощью спектроскопических методов было прослежено формирование коллективных мод ансамбля, которые связывались с резонатором. Учитывая высокую степень управляемости таких искусственных систем, представляется возможной постановка более тонких экспериментов, которые в явном виде продемонстрировали бы квантовую природу данных массивов кубитов [1], для чего требуется индивидуальная адресация к некоторым кубитам в ансамбле или их парам.

В данной работе рассматривается динамика разупорядоченного ансамбля кубитов, взаимодействующих с резонатором. Рассматриваются эффекты конечности числа кубитов в ансамбле и исследуется, как формируются коллективные свойства системы по мере увеличения числа кубитов либо усиления их взаимодействия с резонатором. Выявлено интересное поведение системы, и показано, что динамика оказывается крайне чувствительной к начальным условиям. На основе полученных результатов построено описание эффекта захвата возбуждения в подсистеме кубитов, а также динамики квантовой запутанности, исходно созданной в этой подсистеме. Реализация данных эффектов в эксперименте, а также демонстрация чувствительности динамики к симметрии исходного состояния могут служить в качестве полного доказательства квантовой природы созданных систем.

ЛИТЕРАТУРА

[1] A.A. Zhukov, S.V. Remizov, D.S. Shapiro, W.V. Pogosov, Yu.E. Lozovik, Phys. Rev. A vol. 96, 2017, 033804.

ТЕПЛОЕМКОСТЬ ВЕЙЛЕВСКОГО ПОЛУМЕТАЛЛА В ПАРАЛЛЕЛЬНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ И МАГНИТНОМ ПОЛЯХ

Я.И. Родионов¹, С.В. Сызранов²

¹ИТПЭ РАН

²University of California Santa Cruz, Santa Cruz, CA, USA

Исследована теплоемкость Вейлевского полуметалла в приложенных параллельном электрическом и магнитном полях. Показано, что учет несохранения кирального заряда ввиду приложения внешних электрического и магнитного полей (киральная аномалия) приводит к установлению неравновесного стационарного состояния, вызванного киральным током. Рассчитана зависимость теплоемкости от внешних полей:

$$C_v = \frac{1}{4v^3\hbar^3} \left(\frac{7\pi^2 T^3}{15} + \frac{\Delta\mu^2}{2} T \right),$$

$$\Delta\mu = \frac{60}{7} \left(\frac{\kappa k_0^2}{ke} \right)^2 \frac{(\hbar v)^6 EB}{T^4 \pi n \hbar} \quad (1)$$

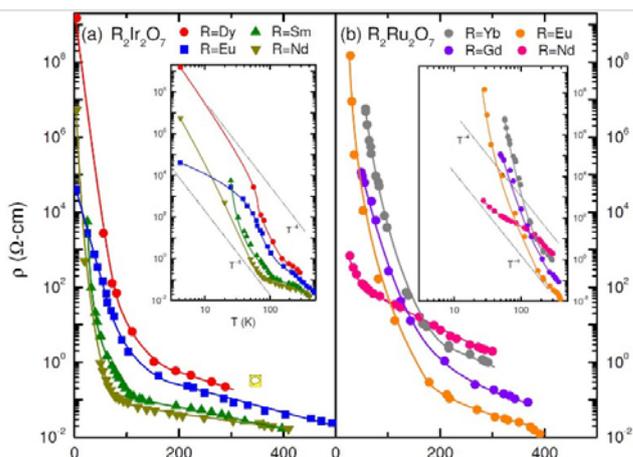


Рис. 1. Зависимость сопротивления от температуры в приготовленных кристаллах иридатов. Включение показывает зависимость $\rho \sim T^{-4}$.

В работе мы опирались на свежие данные (март, 2018) эксперимента группы Arthur Ramirez (UCSC) по измерению сопротивления и теплоемкости в редкоземельных иридатах в зависимости от уровня легирования [1]. Зависимость сопротивления от температуры демонстрирует поведение $\rho \sim T^{-4}$ в точности в соответствии с нашим предсказанием для высоко компенсированного вейлевского полуметалла [2].

Нами предсказана квадратичная зависимость (уравнение (1)) теплоемкости от магнитного и электрического поля.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] A. Sleight, A. Ramirez, Disappearance of the Metal-Insulator Transition in Iridate Pyrochlores on Approaching the Ideal R2Ir2O7 Stoichiometry (to be published)
- [2] Ya.I. Rodionov, S.V. Syzranov, Phys. Rev. B 91, 195107 (2015)

УПРАВЛЯЕМАЯ ВНЕШНИМ ПОЛЕМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЩЕЛЬ И ВОЛНА СПИНОВОЙ ПЛОТНОСТИ В ПОДКРУЧЕННОМ ДВУХСЛОЙНОМ ГРАФЕНЕ

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

¹ИТПЭ РАН

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

Мы проводим теоретическое исследование эффектов электрон-электронного взаимодействия в подкрученном двухслойном графене при приложении к нему внешнего перпендикулярного электрического поля [1]. В подкрученном двухслойном графене кристаллические оси слоев не параллельны друг другу, а образуют некоторый угол θ , который может существенно отличаться для различных образцов. Подкрутка слоев приводит к возникновению муарового узора и сверхструктуры, что в свою очередь влияет на электронные свойства образца. Если угол подкрутки не слишком мал ($\theta > \sim 1-2^\circ$), спектр электронов состоит из четырех дираковских конусов, по два конуса от каждого слоя. Вследствие межслоевой гибридизации, скорость Ферми этих конусов отличается от таковой для однослойного графена: она монотонно уменьшается при уменьшении θ . При приложении внешнего поля, разность потенциалов между слоями приводит к возникновению двух электронных и двух дырочных поверхностей Ферми, обладающих свойством идеального нестинга: электронные и дырочные компоненты Ферми поверхности совпадают друг с другом при параллельном переносе на вектор нестинга \mathbf{q} . Такая зонная структура неустойчива по отношению к открытию диэлектрической щели экситонного типа, возникающей за счет экранированного кулоновского отталкивания электронов. В работе мы показываем, что возникающий экситонный параметр порядка одновременно обладает нетривиальной спиновой структурой, соответствующей волне спиновой плотности с периодом сверхрешетки. Щель в спектре существенно зависит от угла подкрутки и приложенного внешнего поля. Этот результат находится в согласии с транспортными измерениями, выполненными в работе [2]. Наличие нетривиальной спиновой структуры, а также возможности контролировать диэлектрическую щель в спектре двухслойного графена, чрезвычайно интересно, как для различных приложений, так и с фундаментальной точки зрения.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] A.O. Sboychakov *et al.*, submitted to Physical Review Letters; arXiv:1707.08886.
[2] J.-B. Liu, *et al.*, Scientific Reports, vol. 5, 2015, P. 15285.

ОСОБЕННОСТИ ЗАРЯДОВОГО ТРАНСПОРТА И СВЕРХПРОВОДИМОСТИ В СПИН-ДОЛИННЫХ ПОЛУМЕТАЛЛАХ

А.Л. Рахманов^{1,2}, А.О. Сбойчаков^{1,2}, К.И. Кугель^{1,2}, А.В. Рожков^{1,2},
Ф. Нори²

¹ИТПЭ РАН

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

Полуметалл (по-английски, half-metal) представляет собой систему с полной спиновой поляризацией носителей заряда на поверхности Ферми. Такая поляризация обычно возникает из-за сильных электрон-электронных корреляций. Как следствие, известные на сегодняшний день полуметаллы содержат атомы переходных металлов [1]. Переходные металлы могут, однако, представлять проблемы для биосовместимых приложений: многие переходные металлы токсичны или алергенны. В связи с этим представляется актуальным вопрос о возможности создания полуметаллических систем на основе легких атомов. При этом, конечно же, придется пожертвовать сильными корреляциями, т. к. взаимодействие между электронами в материалах из легких атомов не слишком велико.

Недавно нами было продемонстрировано [2], что легирование материала, у которого поверхность Ферми обладает выраженным свойством нестинга, также стабилизирует полуметаллические состояния. Данный механизм не требует сильного взаимодействия, поэтому наличие атомов переходных металлов не обязательно. В изучаемых нами моделях в отсутствие легирования наблюдается волна плотности (спиновой или зарядовой). Волна плотности формируется носителями из четырех зон. Каждая зона характеризуется двумя индексами: зарядовым (электронная/дырочная зона) и спиновым (спин вверх или вниз). Зоны вырождены по спину. Кроме этого, как указывалось выше, электронная и дырочная поверхности Ферми должны обладать хорошим нестингом. Однако, несмотря на высокую симметрию исходной системы, при легировании дополнительные заряды распределяются по имеющимся зонам неравномерно: только две зоны из четырех накапливают заряд. В результате такого нарушения симметрии образуется полуметаллическая двухдолинная поверхность Ферми.

Можно показать, что допустимы два типа такого полуметаллического состояния. Первый тип соответствует полной спиновой поляризации электронов и дырок на поверхности Ферми. Второй тип соответствует полной поляризации по отношению к спин-долинному оператору.

В данном докладе будут проанализированы спиновые и спин-долинные токи в исследуемой системе. Из-за нетривиальной поляризации

поверхности Ферми перенос заряда должен демонстрировать новые свойства. А именно, нами показано, что электрический ток будет сопровождаться переносом спина или спин-долинного заряда. Иными словами, электрический ток приводит к возникновению спинового или спин-долинного тока. Такое свойство может быть интересно для спинтроники и для спин-долинной электроники.

Также нами обсуждаются особенности сверхпроводящего состояния в полуметаллической системе нового типа. Мы покажем, что сверхпроводящий параметр порядка является двухкомпонентным (один компонент определен в дырочной зоне, другой – в электронной). Допустимая симметрия параметра порядка – p-волна.

СОДЕРЖАНИЕ

1.	ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ УСИЛЕНИЕ SERS ФОНОНАМИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛАЗМОННЫХ СТРУКТУР В.Ю. Шишков, <u>Е.С. Андрианов</u> , А.А. Пухов, А.П. Виноградов, ИТПЭ РАН, МФТИ (ГУ), ФГУП ВНИИА им. Н.Л. Духова	3
2.	ВЛИЯНИЕ КОНЕЧНОГО РАЗМЕРА ПЛАЗМОННЫХ НАНОЧАСТИЦ, ОБРАЗУЮЩИХ ПЕРИОДИЧЕСКУЮ ЦЕПОЧКУ, НА СВОЙСТВА РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ ПО НЕЙ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПЛАЗМОНОВ <u>Е.Д. Чубчев</u> , А.В. Дорофеев, А.П. Виноградов, ФГУП ВНИИА им. Н.Л. Духова. ИТПЭ РАН	4
3.	ЯВЛЯЕТСЯ ЛИ ОДНОПРОХОДНЫЙ ЛАЗЕР НАСТОЯЩИМ ЛАЗЕРОМ? <u>И.В. Доронин</u> , Е.С. Андрианов, А.А. Зябловский, А.А. Пухов, Ю.Е. Лозовик, А.А. Лисянский, А.П. Виноградов, ФГУП ВНИИА им. Н.Л. Духова, МФТИ (ГУ), ИТПЭ РАН, CUNY	5
4.	ИССЛЕДОВАНИЕ КОГЕРЕНТНОСТИ ВТОРОГО ПОРЯДКА ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМОННОГО РЕЗОНАТОРА, ВОЗБУЖДАЕМОГО N-V ЦЕНТРОМ <u>Н.Е. Нефедкин</u> , Е.С. Андрианов, А.А. Зябловский, А.А. Пухов, А.П. Виноградов, ИТПЭ РАН, МФТИ (ГУ), ФГУП ВНИИА им. Н.Л. Духова	6
5.	ФОРМИРОВАНИЕ СУБИЗЛУЧАЮЩЕГО СОСТОЯНИЯ АТОМОВ ПРИ ИХ БЛИЖНЕПОЛЬНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ <u>В.Ю. Шишков</u> , А.А. Зябловский, Е.С. Андрианов, А.А. Пухов, А.П. Виноградов, ИТПЭ РАН, МФТИ (ГУ), ФГУП ВНИИА им. Н.Л. Духова	7
6.	ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ ГОЛОГРАФИИ В СОЗДАНИИ СТРУКТУРЫ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН <u>А.М. Мерзликин</u> , А.И. Игнатов, ИТПЭ РАН, ФГУП ВНИИА им. Н.Л. Духова	8
7.	ЛОКАЛИЗАЦИЯ СВЕТА В МЕТАМАТЕРИАЛАХ НА ОСНОВЕ ПЕРИОДИЧЕСКИХ МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МИКРОРЕЗОНАТОРОВ К.Н. Афанасьев, И.В. Быков, И.А. Богинская, <u>А.В. Иванов</u> , И.Н. Курочкин, А.Н. Лагарьков, А.М. Мерзликин, В.В. Михеев, Д.В. Негров, И.А. Рыжиков, М.В. Седова, А.К. Сарычев, ИТПЭ РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова, Химический факультет, ИБХФ РАН, МФТИ (ГУ)	10
8.	НОВЫЙ ГКР СЕНСОР: УСИЛЕНИЕ СИГНАЛА КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ А.В. Елецкий, <u>А.К. Сарычев</u> , И.А. Богинская, Г.С. Бочаров, Н.А. Высочанский, М.С. Егин, А.В. Иванов, И.Н. Курочкин, И.А. Рыжиков, Г.Е. Федоров, ИТПЭ РАН, Национальный исследовательский Университет МЭИ, МФТИ (ГУ), ИБХФ РАН, МПГУ	12

9. **ФУРЬЕ-АНАЛИЗ ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ SERS-АКТИВНЫХ ПОДЛОЖЕК** Б.Д. Тонанайский, И.А. Богинская, И.А. Рыжиков, И.Н. Курочкин, И.А. Родионов, А.С. Бабурин, М.В. Седова, Н.Д. Ушаков, МФТИ (ГУ), ИТПЭ РАН, ИБХФ РАН, НОЦ «Функциональные микро/нано системы» 14
10. **СОЗДАНИЕ ПОДЛОЖЕК ДЛЯ ГКР-АНАЛИЗА МИОГЛОБИНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО ИСПАРЕНИЯ В ВАКУУМЕ** В.А. Дерека, П.Е. Меньшиков, И.А. Богинская, И.А. Рыжиков, К.Н. Афанасьев, М.В. Седова, МФТИ (ГУ), ИТПЭ РАН 16
11. **РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ РАСТВОРА БЕЛКА ДЛЯ КР-ИССЛЕДОВАНИЙ** И.А. Рыжиков, А.В. Зверев, И.А. Родионов, М.В. Седова, И.А. Богинская, Н.Д. Ушаков, И.Н. Курочкин, Б.Д. Тонанайский, С.Ю. Мусатов, ИТПЭ РАН, НОЦ «Функциональные микро/наносистемы», МФТИ (ГУ), МГУ им. М.В. Ломоносова, Химический факультет, ООО Электронный Щит 18
12. **ПРОБОПОДГОТОВКА РАСТВОРОВ БЕЛКОВ ДЛЯ ГКР-ИССЛЕДОВАНИЙ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО И ТЕМПЕРАТУРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ** Д.В. Черкез, И.А. Богинская, И.А. Рыжиков, А.С. Ильин, И.В. Быков, М.В. Седова, И.Н. Курочкин, И.А. Родионов, МФТИ (ГУ), ИТПЭ РАН, ИБХФ РАН, НОЦ «Функциональные микро/нано системы» 20
13. **ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛИ-П-КСИЛИЛЕНА ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В МЕДИЦИНСКОЙ ТЕХНИКЕ** А.Е. Михайлицын, А.В. Гусев, К.А. Маилян, К.Н. Афанасьев, И.А. Рыжиков, ИТПЭ РАН 22
14. **ФОТОРЕЗИСТИВНЫЕ СВОЙСТВА ГРАНУЛИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ CdSe-CdS** С.В. Гуров, И.А. Рыжиков, И.А. Богинская, Ю.В. Трофимов, М.В. Седова, К.Н. Афанасьев, МФТИ (ГУ), ИТПЭ РАН, Центр светодиодных и оптоэлектронных технологий НАН 24
15. **РАССЕЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ КОЛЛИМАТОРА НА БОКОВОЙ СТЕНКЕ КОМПАКТНОГО ПОЛИГОНА** А.В. Никитенко, А.С. Зубов ИТПЭ РАН 26
16. **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ЗЕРКАЛЕ КОЛЛИМАТОРА В АИК-КП** С.А. Федоров, Р.Р.о. Сулейманов, ИТПЭ РАН, МФТИ (ГУ) 28
17. **ПОЛОЖИТЕЛЬНОЕ МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЕ В МАГНИТНЫХ НАНОКОМПОЗИТАХ В СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ** М. Блинов, М. Шахов, Е. Lahderanta, В. Рыльков, А. Грановский, МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет, ФТИ им. А.Ф. Иоффе,

	Lappeenranta University of Technology, Finland, НИЦ "Курчатовский институт", ИТПЭ РАН	29
18.	ОЦЕНКА СОБСТВЕННОЙ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ НИКЕЛЯ ИЗ СВЧ МАТЕРИАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОМПОЗИТОВ С ПОРОШКАМИ НИКЕЛЯ <u>С.Н. Старостенко</u>, К.Н. Розанов, А.О. Ширяев, В.А. Гаранов, А.Н. Лагарьков, ИТПЭ РАН	30
19.	ИЗМЕРЕНИЯ ТОНКИХ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ПЛЕНОК МЕТОДАМИ ФМР И ПРОХОЖДЕНИЯ-ОТРАЖЕНИЯ <u>А.О. Ширяев</u>, К.Н. Розанов, С.Ю. Бобровский, С.С. Маклаков, А.В. Осипов, С.А. Вызулин, А.Б. Грановский, ИТПЭ РАН, Краснодарское высшее военное училище им. генерала армии С.М. Штеменко, МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет	32
20.	ИЗМЕРЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ КОМПОЗИТНЫХ ОБРАЗЦОВ ВБЛИЗИ ПОРОГА ПРОТЕКАНИЯ <u>Д.П. Лелюк</u>, Д.А. Петров, К.Н. Розанов, ИТПЭ РАН	34
21.	ПЛЕНКИ ПЕРМАЛЛОЯ, ПОЛУЧЕННЫЕ РЕАКТИВНЫМ МАГНЕТРОНЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ С МАЛОЙ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ РЕАКТИВНОГО ГАЗА <u>А.С. Набоко</u>, С.С. Маклаков, С.А. Маклаков, С.Ю. Бобровский, А.В. Осипов, Д.А. Петров, В.И. Полозов, И.А. Рыжиков, К.Н. Розанов, И.Т. Якубов, ИТПЭ РАН, МФТИ (ГУ)	36
22.	ОТЖИГ ТОНКИХ ПЛЁНОК VO_{2+x} ВЫШЕ ТОЧКИ ПЛАВЛЕНИЯ <u>С.С. Маклаков</u>, В.И. Полозов, С.А.Маклаков, И.А. Рыжиков, В.Н. Кисель, ИТПЭ РАН, МФТИ (ГУ)	38
23.	ЛАМИНАТЫ НА ОСНОВЕ ТОНКИХ МАГНИТНЫХ ПЛЕНОК: ЗАВИСИМОСТЬ СВЧ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ОТ ПАРАМЕТРОВ СЛОЕВ <u>А.В. Осипов</u>, 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	39
24.	ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОНКИХ ПЛЁНОК VO_2 ДЛЯ ОЦЕНКИ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ПРИКЛАДНЫХ ЦЕЛЯХ <u>В.И. Полозов</u>, С.С. Маклаков, С.А.Маклаков, Л.А. Алексеева, А.С. Набоко, А.Д. Косов, А.Д. Мишин, Д.А. Петров, И.А. Рыжиков, В.Н. Кисель, ИТПЭ РАН, МФТИ (ГУ), МГУ им. М.В. Ломоносова, Химический факультет	40
25.	ПОДАВЛЕНИЕ ЭФФЕКТОВ ВТОРИЧНОЙ ДИФРАКЦИИ В ПЛОСКОСТИ, КАСАТЕЛЬНОЙ К ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛАСТИНЫ И.И. Краснолобов, <u>А.М. Лебедев</u>, И.А. Селин, В.Н. Семенов, Т.А. Фурманова, ИТПЭ РАН	42

26.	ВОЗБУЖДЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА С ПОМОЩЬЮ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЁТКИ, ПОМЕЩЁННОЙ НА ПОВЕРХНОСТЬ ВОЛНОВОДА <u>А.М. Лебедев</u> , М.Л. Обухов, ИТПЭ РАН, МФТИ (ГУ)	44
27.	НЕКОТОРЫЕ СПОСОБЫ ХАОТИЗАЦИИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ В ПОЛОСТИ С БОЛЬШИМ ВХОДОМ <u>А.М. Лебедев</u> , И.А. Селин, Т.А. Фурманова, ИТПЭ РАН	46
28.	МЕТОД СНЕСЕНИЯ ГРАНИЧНОГО УСЛОВИЯ В ЗАДАЧАХ РАССЕЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН НА ОБЪЕКТАХ МАЛОЙ ТОЛЩИНЫ <u>С.Н. Фетисов</u> , А.В. Сетуха, ОКБ им. А. Ляульки, МГУ им. М.В. Ломоносова, Факультет вычислительной математики и кибернетики	48
29.	О ПРИМЕНЕНИИ МИКРОПОЛОСКОВЫХ СШП ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ В СОСТАВЕ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ <u>Г.И. Абдрахманова</u> , И.Л. Виноградова, Е.П. Грахова, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет»	50
30.	МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ ЛЕПЕСТКА СВЧ-РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ С ЗАДАННЫМ ВРЕМЯ-ЧАСТОТНЫМ ПАРАМЕТРОМ И.Л. Виноградова, А.Х. Султанов, А.В. Воронкова, <u>Г.И. Абдрахманова</u> , Е.П. Грахова, И.К. Мешков, Л.З. Янтилина, ФГБОУ ВО «УГАТУ»	52
31.	ШИРОКОПОЛОСНАЯ ПОЛИКОНИЧЕСКАЯ ВИБРАТОРНАЯ АНТЕННА С МАГНИТНЫМ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИМ МАТЕРИАЛОМ В.Н. Семененко, К.М. Басков, <u>Д.И. Акимов</u> , А.А. Политико, В.А. Чистяев, Н.И. Бобков, И.И. Краснолобов, ИТПЭ РАН, АО ВНИИ «Градиент»	53
32.	СВЧ-СПЕКТРЫ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ КАРБОНИЛЬНОГО ЖЕЛЕЗА В.А. Гаранов, С.Г. Кибец, <u>А.А. Политико</u> , В.Н. Семененко, В.А. Чистяев, ИТПЭ РАН	56
33.	ЭКРАНИРУЮЩИЙ КОЛПАК С РАДИОПОГЛОЩАЮЩИМ МЕТАМАТЕРИАЛОМ В.Н. Семененко, <u>К.М. Басков</u> , Д.И. Акимов, А.А. Политико, И.И. Краснолобов, ИТПЭ РАН	58
34.	РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СИНТЕЗА ЗЕРКАЛЬНОГО КОЛЛИМАТОРА МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ <u>Ф.Б. Хлебников</u> , Д.А. Коняев, Н.Е. Шапкина, МГУ им. М. В. Ломоносова, Физический факультет, ИТПЭ РАН	60
35.	РУПОРНЫЙ ОБЛУЧАТЕЛЬ СО СПЕЦИАЛЬНОЙ ДИАГРАММОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ Н.П. Балабуха, <u>Н.Л. Меньших</u> , ИТПЭ РАН	62
36.	ШИРОКОПОЛОСНЫЙ ОБЛУЧАТЕЛЬ КОЛЛИМАТОРА Н.П. Балабуха, М.Д. Бушкин, А.С. Зубов, <u>В.С. Солосин</u> , ИТПЭ РАН, МФТИ (ГУ)	64

37.	МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАХОЖДЕНИЯ ДВУХПОЗИЦИОННОЙ ЭПР ПО ПОЛЮ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ Н.П. Балабуха, <u>Д.А. Коняев</u> , Н.Е. Шапкина, ИТПЭ РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет	66
38.	МАГНИТНАЯ ФАЗОВАЯ ДИАГРАММА И КВАНТОВЫЕ ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ СИСТЕМАХ А.М. Белемук, Н.М. Щелкачев, А.В. Михеенков, <u>К.И. Кугель</u> , ИФВД РАН, ИТПЭ РАН ...	69
39.	ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ТОПОЛОГИЧЕСКОГО ДИЭЛЕКТРИКА: ВЛИЯНИЕ ГЕКСАГОНАЛЬНЫХ ИСКАЖЕНИЙ Р.Ш. Акзянов, <u>А.Л. Рахманов</u> , ИТПЭ РАН, МФТИ (ГУ)	70
40.	ДИНАМИКА МЕЗОСКОПИЧЕСКОГО АНСАМБЛЯ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ КУБИТОВ, СВЯЗАННЫХ С РЕЗОНАТОРОМ <u>В.В. Погосов</u> , С.В. Ремизов, А.А. Жуков, Д.С. Шапиро, Ю.Е. Лозовик, Всероссийский НИИ автоматики им. Н. Л. Духова, ИТПЭ РАН, Институт спектроскопии РАН	71
41.	ТЕПЛОЕМКОСТЬ ВЕЙЛЕВСКОГО ПОЛУМЕТАЛЛА В ПАРАЛЛЕЛЬНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ И МАГНИТНОМ ПОЛЯХ <u>Я.И. Родионов</u> , С.В. Сызранов, ИТПЭ РАН, University of California Santa Cruz, Santa Cruz, CA, USA	72
42.	УПРАВЛЯЕМАЯ ВНЕШНИМ ПОЛЕМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЩЕЛЬ И ВОЛНА СПИНОВОЙ ПЛОТНОСТИ В ПОДКРУЧЕННОМ ДВУХСЛОЙНОМ ГРАФЕНЕ <u>А.О. Сбойчаков</u> , А.В. Рожков, А.Л. Рахманов, Ф. Нории, ИТПЭ РАН, Center for Emergent Matter Science, RIKEN, Wako-shi, Saitama, Japan	73
43.	ОСОБЕННОСТИ ЗАРЯДОВОГО ТРАНСПОРТА И СВЕРХПРОВОДИМОСТИ В СПИН-ДОЛИННЫХ ПОЛУМЕТАЛЛАХ А.Л. Рахманов, А.О. Сбойчаков, К.И. Кугель, <u>А.В. Рожков</u> , Ф. Нории, ИТПЭ РАН, Center for Emergent Matter Science, RIKEN, Wako-shi, Saitama, Japan	74

ДЛЯ ЗАМЕТОК

**ДЕВЯТНАДЦАТАЯ ЕЖЕГОДНАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ИТПЭ РАН**

Сборник тезисов докладов

Подписано в печать 04.18		Формат 60x84/16
Печать офсетная	Уч.-изд.л. 2,25	Усл.-печ.л 2,09
Тираж 100 экз.	Заказ № 90	

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