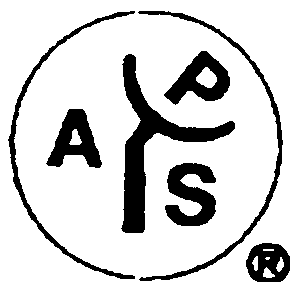
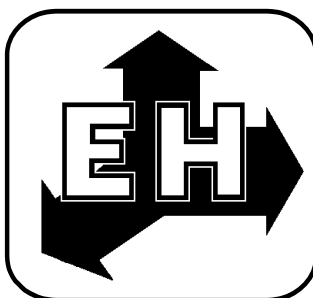


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ПРИКЛАДНОЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ РАН
(ИТПЭ РАН)

IEEE-APS-LEOS-CHAPTER



СЕМНАДЦАТАЯ ЕЖЕГОДНАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ИТПЭ РАН

(Москва – 16 - 19 мая 2016 г.)

Сборник тезисов докладов

СЕМНАДЦАТАЯ Я ЕЖЕГОДНАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ИТПЭ РАН ПРИ ПОДДЕРЖКЕ IEEE-APS-LEOS-CHAPTER

Сборник тезисов докладов.

Под редакцией д.ф.-м.н. В.Н. Киселя – М.: ИТПЭ РАН. 2016. 65 с.

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

Конференция посвящена обзору научных разработок и практических приложений, осуществленных в Институте теоретической и прикладной электродинамики РАН 2015 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. Лагерьков
д.ф.-м.н. В.Н. Кисель
д.ф.-м.н. И.Т. Якубов
к.ф.-м.н. А.Т. Кунавин
М.Е. Жукова

ВЛИЯНИЕ ТОПОЛОГИИ МАГНИТНОЙ ПОДСИСТЕМЫ НА ТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА ГЕТЕРОСТРУКТУР С ДЕЛЬТА-СЛОЕМ Mn

Б.А. Аронзон^{1,2}, Л.Н. Овешников², К.И. Кугель¹, V. Tripathi³

¹ИТПЭ РАН

²Физический Институт им. П.Н. Лебедева РАН

³Tata Institute for Fundamental Research, Mumbai, India

Детектирование спиновой поляризации носителей заряда может быть проведено разными способами, однако, наиболее простым является наблюдение аномального эффекта Холла (АЭХ). Возникновение АЭХ связывается с нарушением T -симметрии, ввиду наличия магнитных моментов, в системах с сильным спин-орбитальным взаимодействием. В литературе предложено несколько механизмов, способных приводить к конечному вкладу в АЭХ.

В данной работе были исследованы транспортные свойства квантовых ям GaAs/InGaAs, с пространственно отделенным δ -слоем Mn. При исследовании образцов с различным типом проводимости (дрейфовая и прыжковая) удалось выделить схожие особенности в их поведении и механизмах АЭХ. В обоих случаях наблюдается смена знака магнетосопротивления (МС) при охлаждении и максимум на температурной зависимости сопротивления, связанный с переходом от локального упорядочения к дальнему магнитному порядку. Наблюдается несколько температурных областей с различными функциональными зависимостями АЭХ от температуры, соответствующих смене механизмов АЭХ. Также экспериментально было обнаружено появление низкотемпературного вклада в АЭХ, связанного с возникновением нетривиальной топологии магнитной подсистемы и приобретением соответствующей геометрической фазы (фазы Берри) волновой функцией дырок в канале проводимости. Наличие этого вклада отчетливо видно на параметрических зависимостях аномальной компоненты холловского сопротивления от R_{xx} , как при дрейфовой, так и при прыжковой проводимости [1].

Работа поддержана грантом МОН 14.613.21.0019-RFMEFI61314X0019.

ЛИТЕРАТУРА

[1] L.N. Oveshnikov et al., Scientific Reports, vol. 5, 2015, id. 17158.

**ЭФФЕКТ УСИЛЕНИЯ СИГНАЛА ГИГАНТСКОГО
КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ НА УПОРЯДОЧЕННОМ
МАССИВЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИГЛ С НАНОМЕТРОВЫМИ
РАЗМЕРАМИ**

**К.Н. Афанасьев¹, И.А. Богинская¹, И.А. Будашов², А.В. Зверев³,
И.Н. Курочкин², И.А. Рыжиков¹, А.К. Сарычев¹, А.В. Иванов¹,
М.В. Седова¹, И.А. Родионов³, А.Н. Лагарьков¹**

¹ИТПЭ РАН

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

³НОЦ "Функциональные микро/наносистемы"

Использование эффекта локализации электромагнитного поля в профилированном диэлектрике для усиления сигнала комбинационного рассеяния адсорбированных на нем молекул является перспективным методом для детектирования малых концентраций органических веществ различной природы. Предварительные исследования показали возможную эффективность использования профилированных диэлектрических подложек для усиления сигнала комбинационного рассеяния органических молекул [1].

В работе были исследованы усиливающие свойства профилированных подложек из высокоомного кремния, на которых сформирован массив остроконечных игл с радиусом закругления порядка 10 нм, высотой иглы – 500 нм и диаметром основания – 300 нм. Структура характеризовалась периодами 3 мкм и 2,12 мкм. В экспериментах регистрировали спектр комбинационного рассеяния молекул тионитробензойной кислоты (ТНБ), которая была химически адсорбирована на наночастицах золота со средним диаметром 56 нм. Профилированные подложки предварительно были обработаны полимером ПДДА, который обеспечивал адгезию модифицированных наночастиц золота к поверхности подложки. После обработки поверхности полимером методом адсорбции из водного раствора были осаждены наночастицы золота. Исследования с помощью сканирующего электронного микроскопа показали, что наночастицы сформировали агрегаты со средним размером 1 мкм между иглами и на иглах, а также адсорбировались в виде отдельных наночастиц и групп по 2 – 10 наночастиц, в том числе на вершинах игл. В качестве образца сравнения использовали необработанный кремний с аналогичной меткой.

Для исследования усиливающих свойств подложки измеряли спектры комбинационного рассеяния ТНБ с помощью объектива 100х. Далее картировали распределение интенсивности полосы при 1346 см⁻¹ сигнала комбинационного рассеяния группы NO₂ с помощью спектрометра WITec на длине волны возбуждения 785 нм с помощью объективов 10х и 50х.

Измеренные сигналы нормировали на количество наночастиц золота. Результаты картирования показали общую эффективность подложек для усиления сигнала до 10 раз. Детальные исследования спектров с объективом 100х показали различные усиления в зависимости от расположения наночастицы. Максимальное усиление до 200 раз наблюдали на кончиках игл по отношению к сигналу на чистой кремниевой подложке. Также наблюдалось усиление порядка 40 на наночастицах золота, расположенных между иглами.

ЛИТЕРАТУРА

[1] *A.V. Ivanov, A.V. Vaskin, A.N. Lagarkov, A.K. Sarychev. The field enhancement and optical sensing in the array of almost adjoining metal and dielectric nanorods // Proc. of SPIE Vol. 9163 91633C-11. 2014.*

УСИЛЕНИЕ СИГНАЛА ГИГАНТСКОГО КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ НА ПОДЛОЖКАХ НА ОСНОВЕ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

К.Н. Афанасьев¹, И. А. Богинская¹, И.В. Быков¹, И.А. Будашов²,
И.Н. Курочкин², А. В. Дорофеев¹, И.А. Рыжиков¹, Р.А. Сиразов³

¹ИТПЭ РАН

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

³МФТИ (ГУ)

Численный эксперимент показал, что последовательное усиление интенсивности поля на границе слоёв фотонного кристалла приводит к значительному, вплоть до 10^3 раз, усилению интенсивности поля на границе с внешней средой, что, в свою очередь, позволяет предположить, что данные структуры будут перспективны в качестве электродинамически активных подложек для усиления сигнала комбинационного рассеяния [1].

В работе исследовали плёнки из чередующихся пар слоёв диоксида кремния (SiO_2) и диоксида циркония (ZrO_2):

$\{\text{ZrO}_2 \text{ 130 нм-SiO}_2 \text{ 280 нм}\} \times (N-1) - \{\text{ZrO}_2 \text{ 130 нм-SiO}_2 \text{ 260 нм}\}$, $\{\text{ZrO}_2 \text{ 105 нм - SiO}_2 \text{ 250 нм}\} \times N$, где N составляет 2 и 4;

$\{\text{ZrO}_2, \text{105 нм-SiO}_2, \text{250 нм}\} \times N - \{\text{ZrO}_2, \text{105 нм-SiO}_2, \text{250 нм}\}$, где N составляет 3 и 4.

Пленки были получены методом электронно-лучевого испарения в вакууме на стеклянных подложках. В качестве образцов сравнения использовали стеклянные подложки с нанесённым с помощью электронно-лучевого испарения слоя SiO_2 толщиной больше 200 нм. С помощью эллипсометрических исследований проверили соответствие сформированных покрытий теоретическим расчётам.

При измерении спектров комбинационного рассеяния возбуждали структуры через призму в геометрии (призма SiO_2)/фотонный кристалл и из воздуха с помощью лазера с длиной волны 785 нм. Для сравнения усиливающих свойств подложек использовали специальную метку, которая представляла собой тионитробензойную кислоту (ТНБ), адсорбированную на наночастицах золота размером 56 нм. Наночастицы наносили на поверхность подложек с помощью адсорбции из водного раствора.

Сравнения эффективности подложек проводили, измеряя интенсивность полосы колебания нитро группы NO_2 при 1346 см^{-1} молекулы ТНБ, предварительно нанесённой на поверхность кристалла. Возбуждающее излучение с длиной волны 785 нм подводили под одинаковыми углами из воздуха и через призму на исследуемую структуру и контрольный образец и сравнивали их интенсивности. Варьируя угол падения возбуждающего излучения, находили максимум усиления интенсивности рассеяния.

В результате проведённого исследования получили усиление интенсивности комбинационного рассеяния на фотонном кристалле в 30 раз по сравнению с электродинамически не активной подложкой SiO₂ при возбуждении из воздуха.

При измерении плёнок - {ZrO₂,105 нм-SiO₂,250 нм}xN - { ZrO₂,105 нм-SiO₂, 250 нм}, получили характерное распределение интенсивностей от угла падения лазерного луча, предсказанное теоретически [1]. Также в результате проведённых эллипсометрических измерений нашли, что слой золотых наночастиц на поверхности фотонного кристалла сильно изменяет аппаратную функцию системы, а именно ослабляет наблюдаемый эффект усиления.

Проведённое исследование показало, что фотонные кристаллы могут быть использованы в качестве электродинамически активных подложек для усиления сигнала сенсоров, работающих на эффекте гигантского комбинационного рассеяния.

ЛИТЕРАТУРА

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

КОМПОЗИТНЫЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МЕТАМАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ПЕРИОДИЧЕСКИХ НАНОСТРУКТУР

А.Н. Лагарьков¹, И.А. Богинская¹, И.А. Будашов², А.А. Ежов²,
А.А. Федянин², А.В. Иванов¹, И.Н. Курочкин^{2,3}, С.С. Косолобов⁴,
А.В. Латышев⁴, Д.А. Насимов⁴, И.А. Рыжиков¹, М.Р. Щербаков²,
А.В. Васькин¹, А.К. Сарычев¹

¹ИТПЭ РАН

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

³ИБХФ им. Н.М. Эмануэля

⁴ИФП СО РАН

Проведено теоретическое и экспериментальное исследование новых композитных диэлектрических метаматериалов на основе периодических полос из полиметилметакрилата (ПММА) на подложке из золота в оптической области частот (Рис.1).

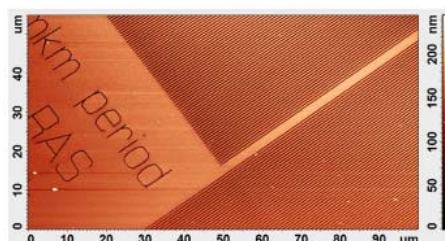


Рис.1 АСМ. Периодическая структура на основе ПММА на подложке из золота. Параметры: Период $a=670-680$ нм, толщина пленки золота $d_1=40$ нм, толщина слоя ПММА $d_2=1700$ нм.

Новые метаматериалы реализуют возможность фокусировки гигантских электромагнитных полей на поверхности диэлектрика благодаря возбуждению интерференционных волн [1]. Экспериментальные результаты по измерению коэффициента отражения в широком диапазоне углов падения волны согласуются с результатами компьютерного моделирования (Рис.2).

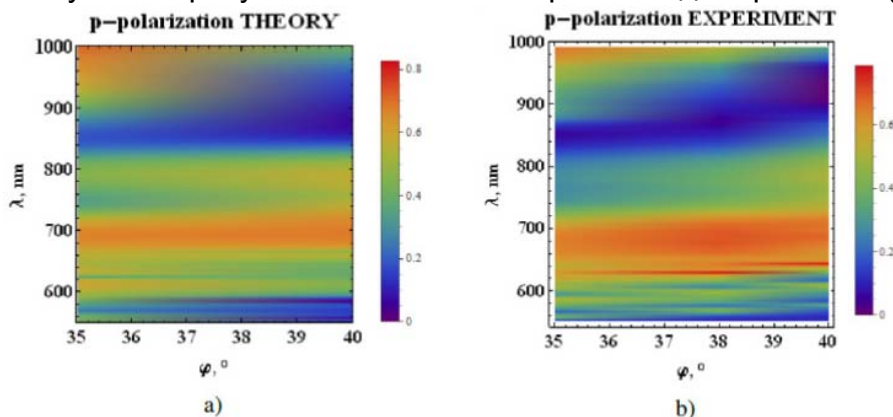


Рис.2 Рассчитанный (а) и измеренный (б) коэффициент отражения в зависимости от угла падения и длины волны.

Показано, что при угле падения $\theta = 35 - 40^\circ$ (по отношению к нормали) имеется широкополосный резонанс в диапазоне длин волн от 800 до 900 нм. На поверхность метаматериала были иммобилизованы наночастицы золота (НЧЗ) среднего размера (56 ± 1) нм, покрытые 5.5-дителио-бис (2-нитробензойной кислотой) (ДТНБ). Доли поверхности, занимаемые НЧЗ, оценены как $(2,8 \pm 0,7)\%$ в неструктурированной области, и $(4,0 \pm 1,9)\%$ в области решетки. Измерения комбинационного рассеяния (КР) от конъюгата НЧЗ-ТНБ показали, что основные линии ДТНБ (326 см^{-1} , 1060 см^{-1} , 1338 см^{-1} , 1558 см^{-1}) усилены от 2 до 6 раз в структурированной области по сравнению с пленкой. В данной работе продемонстрировано гигантское комбинационное рассеяние в диэлектрических метаматериалах. Резонансные частоты могут настраиваться вариацией геометрических параметров элементов, составляющих поверхность метаматериала.

ЛИТЕРАТУРА

[1] A. Lagarkov, I. Budashov, V. Chistyayev, A. Ezhov, A. Fedyanin, A. Ivanov, I. Kurochkin, S. Kosolobov, A. Latyshev, D. Nasimov, I. Ryzhikov, M. Shcherbakov, A. Vaskin, and A. K. Sarychev. SERS-active dielectric metamaterials based on periodic nanostructures // Optics Express Vol. 24 (7), 7133-7150 (2016).

ПРОВОДИМОСТЬ И АНОМАЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ ХОЛЛА МАГНИТНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ НЕСТЕХИОМЕТРИЧЕСКИХ ОКСИДОВ

**В.В. Рыльков^{1,2}, С.Н. Николаев², К.Ю. Черноглазов²,
А.В. Ситников³, Ю.Е. Калинин³, А.Б. Грановский^{1,4}**

¹ИТПЭ РАН

²Национальный исследовательский центр "Курчатовский Институт"

³Воронежский Государственный Технический Университет

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

В диапазоне температур 4.2-300 К исследованы магнитотранспортные свойства пленочных наноконпозитов $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{AlO}_y)_{100-x}$ и $(\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2)_x(\text{AlO}_y)_{100-x}$ на основе нестехиометрического оксида AlO_y с содержанием аморфного ферромагнитного металла вблизи перехода металл-изолятор ($56 > x > 30$ at.%). Данная система интересна наблюдаемым в ней эффектом резистивного переключения под действием электрического поля, предположительно связанным с движением в диэлектрике вакансий кислорода, который может быть использован для создания мемристоров.

Исследованные в работе наноконпозиты были получены ионно-лучевым распылением составных мишеней, представляющих собой литые основы ферромагнитных сплавов, на поверхности которых были размещены пластины оксида алюминия. Особенности данного метода, заключались в том, что он позволял получать в одном технологическом цикле композиционные системы с непрерывно изменяющимся соотношением металлической и диэлектрической фаз в широких пределах в зависимости от положения подложки относительно мишени.

Установлено [1], что при содержаниях металла $56 > x > 49$ at.% проводимость наноконпозитов хорошо описываются логарифмическим законом $\sigma(T) = A(1 + \alpha \ln T)$, причем произведение параметров $A \cdot \alpha$ практически не зависит от x . Данная зависимость согласно [2] объясняется особенностями кулоновского взаимодействия в металл-диэлектрических композитах в переходной области концентраций от металлической проводимости к диэлектрическому режиму. При этом наклон данных зависимостей определяется размером ферромагнитных нанокластеров, который в обоих наноконпозитах оказался одинаковым и равным около 8 нм. Показано также, что проводимость образцов с содержанием металла $x < 47$ at.% следует «закону $1/2$ ».

Впервые в нанокompозитах в условиях логарифмической зависимости проводимости обнаружен необычный скейлинг в поведении сопротивления

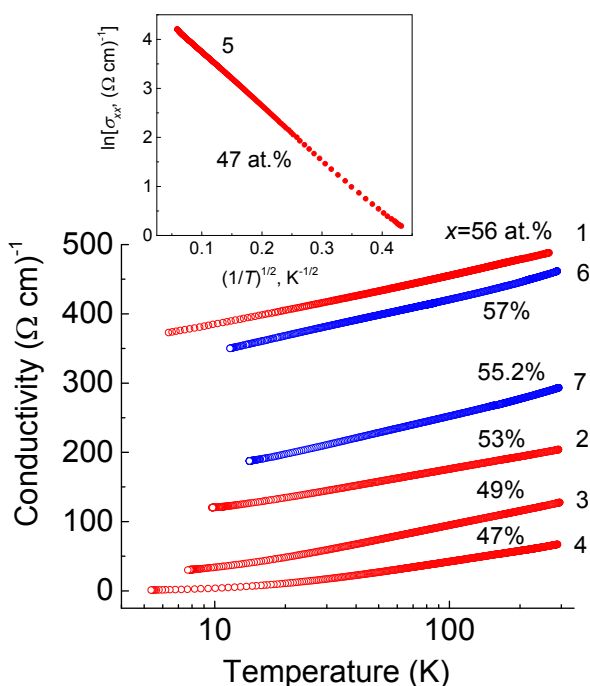


Рис.1 Температурные зависимости проводимости нанокompозитов $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{AlO}_y)_{100-x}$ (кривые 1-5) и $(\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2)_x(\text{AlO}_y)_{100-x}$ (кривые 6, 7) с различным содержанием ферромагнитного сплава.

аномального эффекта Холла (R_H) от продольного сопротивления (R_{xx}): $R_H \propto (R_{xx})^m$, где параметр $m \approx 0.4$ при изменении температуры и $m \approx 0.2$ при фиксированной температуре ($T = 10-40$ K) и изменении x в диапазоне 49-56 at.%. Обнаруженный скейлинг связывается с особенностями перколяции в условиях перехода металл-изолятор, нестехиометричностью оксида и спин-орбитальным рассеянием электронов на поверхности гранул и дефектах (вакансиях кислорода) при их межгранульном туннелировании [3]. Подобный скейлинг в нанокompозитах типа Ni-SiO₂ на основе стехиометрического

оксида SiO₂ отсутствует [4].

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 15-07-01160, № 15-02-02077, № 16-07-00798, № 16-07-00657.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ю.О. Михайловский, В.Н. Прудников, В.В. Рыльков и др., ФТТ, том 58, 2016. С.433.
- [2] I.S. Beloborodov et al., Rev. Mod. Phys. vol.79, 2007. P.469.
- [3] A. Vedyayev et al., Phys. Rev. Lett., vol. 110, 2013. P.247204.
- [4] D. Bartov et al., Phys. Rev. B, vol. 90, 2014. P.144423.

ТОРОИДНЫЙ ОТКЛИК В МЕТАМАТЕРИАЛАХ

**А.А. Башарин¹, Н.А. Вольский¹, М.В. Кожокар¹, И.В. Стенищев¹,
А.В. Устинов^{1,2}, К.И. Щеголева¹, В.И. Чугуевский³**

¹Лаборатория “Сверхпроводящие метаматериалы”

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

²Physikalisches Institut, Karlsruhe Institute of Technology

³Воронежский государственный технический университет

Основные усилия исследователей в области метаматериалов сосредоточены на проблемах достижения отрицательных значений диэлектрической и магнитной проницаемости, а также таких эффектов как сверхразрешение, распространение волн, в волноводах с размерами меньше длины волны, сверхсильная локализация полей, создание “нано”- антенн и т.д. В тоже время, существует широкий круг задач, которые интересны вне вопроса отрицательной рефракции и способов ее достижения, а именно задачи связанные с возбуждением тороидного отклика в метаматериалах и необычные явления, связанные с ним [1].

Тороидный диполь – это отдельный элемент мультипольного разложения, соответствующий электрическим токам, циркулирующим на поверхности тора вдоль его меридианов (так называемые полоидные токи). Тороидный диполь был впервые введен Зельдовичем [2] в 1957 году, который предположил, что такое возбуждение возникает за счет статических токов (ананоль), возникающих в атомном ядре и смог объяснить нарушение четности в слабом взаимодействии в атомной физике. С тех пор, как существование статического тороидальной диполя было предсказано, его значение было обсуждено в ряде твердотельных систем, включая сегнетоэлектрики и наноферромагнетики и ферромагнитных микроструктурах, мультиферроиках, молекулярных магнитов и др. [2].

Намного меньше известен динамический тороидный момент. Хотя стандартное мультипольное разложение демонстрирует излучаемые источником поля, тороидный дипольный момент не включен в это разложение и часто исключается из рассмотрения в классической электродинамике. Будучи, физически отличным от динамического электрического дипольного момента, тороидный момент излучает с тем же самым угловым моментом и свойствами в дальней зоне. Следовательно, тороидный и электрические дипольные моменты неотличимы для любого удаленного наблюдателя. Существование динамического тороидного диполя также показывает, что следует проявлять осторожность при установлении связи между свойствами дальнего поля электромагнитного источника и распределения заряда/ тока, возбуждающего источник. Это относится ко

многим областям науки, изучающей электромагнитные взаимодействия, и, в частности, для нанофотоники и плазмоники, где топология заряда-тока возбуждения служит для повышения локальных оптических полей. Кроме того, учитывая явную тороидальную топологию большого количества биологически важных макромолекул и белковых комплексов, вполне разумно ожидать, что электромагнитные взаимодействия, связанные с тороидным дипольным моментом (и высших его мультиполей) может сыграть особую роль в природе.

Обнаружение тороидальных возбуждений является сложной задачей. Динамический тороидный диполь взаимодействует с $\text{curl } \mathbf{V}$ и слабо взаимодействует со свободным пространством, в то время как его проявление может быть замаскировано более сильными электромагнитными эффектами из-за электрических и магнитных дипольных моментов и даже электрического квадрупольного. Экспериментальное обнаружение тороидного отклика стало возможно только недавно, благодаря использованию концепции метаматериалов [3]. Эта концепция дает возможность наблюдать новые и экзотические оптические явления, контролируя характер электромагнитного отклика с помощью искусственно структурированных сред в субволновом масштабе. Тороидный дипольный отклик был продемонстрирован в метаматериалах состоящих из специально спроектированных металлических метамолекул тороидной топологии, с пониженными электрическим и магнитными дипольными моментами, в то время как тороидный отклик был спектрально выделен и резонансно увеличен до измеряемого уровня. Эта демонстрация открыла путь к проверке удивительных предсказаний, связанных с тороидным моментом, и стимулировали работы по разработке метаматериалов и плазмонных систем, проявляющих сильный тороидный отклик [1].

В этой работе, мы ставим цель преодолеть один из главных недостатков метаматериалов, известных в литературе на сегодняшний день, а именно диссипативные потери и потери на излучение. Это следует из омического сопротивления металлических резонаторов, входящих в конструкцию существующих метаматериалов и может существенно помешать возбуждению тороидных мультиполей с учетом их слабой связи с внешними полями.

Для решения этой проблемы мы обсудим диэлектрические метаматериалы [4], которые практически свободны от диссипативных потерь и способны поддерживать сильные резонансные тороидальные возбуждения.

Кроме того, мы представим результаты исследования планарных тороидных метаматериалов, которые обладают экстремально высокими

значениями добротности $Q \sim 40000$ [5]. Мы также покажем, что благодаря уникальной топологии тороидного дипольного элемента его электрическое/магнитное поле может быть ограничено в субволновой области включений метаматериалов, что делает предлагаемые метаматериалы жизнеспособной платформой для применения их в нелинейном режиме.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ по программе повышения конкурентоспособности НИТУ «МИСиС» среди ведущих мировых научно-образовательных центров (№К4-2015-031), грантом РФФИ 16-02-00789, а также Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG). Также мы выражаем благодарность компании Rohde & Schwarz ZNC3 за предоставленный векторный анализатор цепей ZVC3.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *N. Papasimakis, V. A. Fedotov, V. Savinov, T. A. Raybould & N. I. Zheludev*, Electromagnetic toroidal excitations in matter and free space, *Nature Materials* 15, 263–271 (2016).
- [2] *B. Zel'dovich*, Electromagnetic interaction with parity violation, *Sov. Phys. JETP*, 6, 1184 (1958).
- [3] *T. Kaelberer et al*, Toroidal Dipolar Response in a Metamaterial, *Science*, 330, 1510-1512 (2010).
- [4] *Alexey A. Basharin, Maria Kafesaki, Eleftherios N. Economou, Costas M. Soukoulis, Vassili A. Fedotov, Vassili Savinov, and Nikolay I. Zheludev*, Dielectric Metamaterials with Toroidal Dipolar Response, *Phys. Rev. X* 5, 011036 (2015).
- [5] *Alexey A. Basharin, Vitaliy Chuguevskiy, Nikita Volsky, Maria Kafesaki, Eleftherios N. Economou, Alexey V. Ustinov*, Extremely high Q-factor toroidal metamaterials, 10th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics – Metamaterials 2016, Crete, Greece.

КАНОНИЧЕСКОЕ КВАНТОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПЛАЗМОН ПОЛЯРИТОНОВ

**В.Ю. Шишков^{1,2}, Е.С. Андрианов¹, А.А. Пухов^{1,2}, А.П. Виноградов^{1,2},
А.А. Лисянский^{3,4}**

¹МФТИ (ГУ)

²ИТПЭ РАН

³Department of Physics, Queens College of the City University, New York

⁴The Graduate Center of the City University, New York

Представлена процедура канонического квантования плазмонов шарика, среда которого моделируется осцилляторами Лорентца. Показано, что электрическое поле, приходящееся на один плазмон, полностью определяется диэлектрической проницаемостью, значения которой получаются в ходе решения однородной задачи. Показано, что развитый нами метод в пределе малых потерь даёт тот же ответ для кванта продольного поля плазмона, что и феноменологический подход [1-3].

В кулоновской калибровке вычислены и проквантованы колебания среды с учётом действия на неё скалярного потенциала, отдельно проквантован векторный потенциал. Полученные квантованные подсистемы взаимодействуют между собой в силу возникновения мультипольных моментов в шарике. Возбуждение одной из подсистем неизбежно ведёт к возбуждению второй подсистемы. Этот факт тесно связан запаздывающим характером возбуждаемого электрического поля. В заключение путем замены полученных значений диэлектрической проницаемости значениями для реальных материалов оценена величина продольного электрического поля, приходящееся на один квант плазмона, для металлического шарика, сделанного из золота и серебра.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *E. S. Andrianov, A. A. Pukhov, A. P. Vinogradov, A. V. Dorofeenko, and A. A. Lisyansky*, *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications* 12, 387 (2014).
- [2] *F. Alpeggiani and L. Andreani*, *Plasmonics* 9, 965 (2014).
- [3] *A. Archambault, F. Marquier, J.-J. Greffet, and C. Arnold*, *Physical Review B* 82, 035411 (2010).

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НЕБЛИЖАЙШИХ СОСЕДЕЙ В ЦЕПОЧКАХ КОЛЬЦЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ

А.М. Пикалов¹, А.В. Дорофеев^{2,3}, А.П. Виноградов^{2,3}, А.Б. Грановский^{1,2}

¹МГУ им. Ломоносова

²ИТПЭ РАН

³МФТИ (ГУ)

В плазмонике цепочки наночастиц играют значительную роль. Цепочки сферических наночастиц [1, 2], кольцевых резонаторов [3-5] и наночастиц другой формы были рассмотрены в большом количестве работ. Обычно считается, что затухание в конечных цепочках происходит экспоненциальным образом и описывается решением в бесконечной цепочке. Однако, в ряде работ [1, 2, 6] могут быть обнаружены неэкспоненциальные вклады. Неэкспоненциальный вклад был отмечен в [7], где дается полуаналитическая теория, основанная на формализме функций Грина.

Как правило, дисперсия в бесконечных цепочках находится в приближении взаимодействия ближайших соседей, так как при учете взаимодействия ближайших соседей не было замечено никаких качественных искажений дисперсионных кривых [3, 4].

В данной работе мы интерпретируем неэкспоненциальный вклад в профиль затухания в терминах решений в бесконечной системе и на примере аксиальной цепочки кольцевых резонаторов показываем, что взаимодействие ближайших соседей является определяющим для такой интерпретации.

Нами рассмотрено возбуждение первого кольцевого резонатора в цепочке из 60 элементов. Показано наличие экспоненциального затухания вблизи источника и неэкспоненциального (степенного) – на дальних расстояниях. Такое поведение уже рассматривалось в [7] для цепочки сферических наночастиц.

Для того чтобы соотнести полученное распределение поля с волнами, распространяющимися в бесконечной цепочке кольцевых резонаторов, мы ищем преобразование Фурье от распределения комплексных амплитуд тока. Полученный спектр содержит две особенности: лоренцевский пик в области отрицательных k и некоторую неопределенную особенность в области положительных k .

Далее, мы ищем решение в бесконечной цепочке с учетом взаимодействия с конечным числом соседей. При учете взаимодействия с соседями дальних порядков на выбранной частоте можно наблюдать $2n$ решений [8]. Однако большая их часть – сильно затухающие. Остальные, достаточно слабо затухающие решения, сгруппированы на спектре в

окрестностях каждой из двух имеющихся особенностей. Мы видим, что лоренцевская особенность образована небольшой группой решений, в то время как неопределенная особенность в области положительных k образована большим набором решений. Эти особенности связаны с экспоненциальным и неэкспоненциальным вкладом, соответственно.

Таким образом, показано, что при учете взаимодействия ближайших соседей дисперсионное уравнение на каждой частоте имеет множество решений. Эти решения образуют экспоненциальный профиль затухания вблизи источника и неэкспоненциальный (степенной) – на дальних расстояниях.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *M. Quinten, A. Leitner, J. Krenn, F. Aussenegg*, "Electromagnetic energy transport via linear chains of silver nanoparticles," *Optics Letters*, vol. 23, pp. 1331-1333, 1998.
- [2] *W. Weber, G. Ford*, "Propagation of optical excitations by dipolar interactions in metal nanoparticle chains," *Physical Review B*, vol. 70, p. 125429, 2004.
- [3] *E. Shamonina, V. Kalinin, K. Ringhofer, L. Solymar*, "Magnetoinductive waves in one, two, and three dimensions," *Journal of Applied Physics*, vol. 92, pp. 6252-6261, 2002.
- [4] *L. Solymar, E. Shamonina*, *Waves in metamaterials*: Oxford University Press, 2009.
- [5] *H. Liu, Y. Liu, T. Li, S. Wang, S. Zhu, X. Zhang*, "Coupled magnetic plasmons in metamaterials," *Physica Status Solidi (b)*, vol. 246, pp. 1397-1406, 2009.
- [6] *B. Willingham, S. Link*, "Energy transport in metal nanoparticle chains via sub-radiant plasmon modes," *Optics Express*, vol. 19, pp. 6450-6461, 2011.
- [7] *K. H. Fung, R. C. H. Tang, C. Chan*, "Analytical properties of the plasmon decay profile in a periodic metal-nanoparticle chain," *Optics Letters*, vol. 36, pp. 2206-2208, 2011.
- [8] *L. Brillouin, M. Parodi*, *Propagation of waves in periodic structures*: Dover, New York, 1953.

ПЛАЗМОННО-ФОТОННАЯ ПЛАСТИНА КАК ЭЛЕМЕНТ ОПТИЧЕСКОГО СЕНСОРА

А.М. Мерзликин¹, А.В. Барышев²

¹ИТПЭ РАН

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе

В последнее время широкое распространение получило использование поверхностных волн для создания элементов оптических сенсоров. Основой для такого использования является высокая чувствительность дисперсии поверхностной волны к изменению диэлектрической проницаемости компонентов сред, вдоль которых она распространяется. Примером успешного использования поверхностной волны для создания сенсоров являются плазмонные биосенсоры [1].

Плазмонные биосенсоры представляют собой пленку металла (как правило, золота, серебра или меди) и слой химически активного вещества, который, реагируя с анализируемой жидкостью, в случае наличия исследуемого вещества, изменяет свой показатель преломления. При изменении показателя преломления происходит сдвиг частоты поверхностного плазмонного резонанса, и в результате коэффициент отражения (измеряемый, как правило, в схеме Кречманна) существенно изменяется. Одним из существенных недостатков плазмонных биосенсоров является принципиальное ограничение чувствительности таких сенсоров, связанное с наличием потерь в металлической пленке.

Альтернативу плазмонным сенсорам могут составить сенсоры на поверхностной, так называемой блоховской волне [2], возникающей на границе фотонного кристалла и среды с меньшим показателем преломления (меньшим, чем один из компонентов фотонного кристалла). Эта волна формируется, с одной стороны, за счет полного внутреннего отражения от среды с меньшим показателем преломления, а с другой стороны – за счет отражения от запрещенной зоны фотонного кристалла. При распространении поверхностной блоховской волны омические потери почти полностью отсутствуют, поскольку фотонный кристалл можно сделать из непоглощающих компонентов. Увеличение добротности моды ведет к увеличению чувствительности сенсора, поскольку резонанс становится узким, и даже небольшой сдвиг резонансной частоты существенно изменяет распределение поля. Однако, такая структура оказывается очень чувствительна даже к небольшим шероховатостям поверхности. Эти шероховатости приводят к значительному некогерентному рассеиванию (поскольку максимум поля поверхностной волны приходится на границу фотонный кристалл-вакуум).

В данной работе предложено использовать фотонный кристалл с нанесенным на его поверхность слоем металла [3-5]. Расчеты показали, что такая структура обладает высокой чувствительностью к малым изменениям диэлектрической проницаемости исследуемого аналита, а с другой стороны является достаточно робастной к неидеальности изготовления.

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] *Homola J.; Piliarik M.* Surface Plasmon Resonance Based Sensors. In Springer Series on Chemical Sensors and Biosensors; Springer-Verlag: Berlin, Germany, 2006.
- [2] *Konopsky V.N.; Karakouz T.; Alieva E.V.; Vicario C.; Sekatskii S.K.; Dietler G.* Photonic crystal biosensor based on optical surface waves. *Sensors* 2013, 13, 2566–2578.
- [3] *Baryshev A.V.; Merzlikin A.M.; Inoue M.* Efficiency of optical sensing by a plasmonic photonic-crystal slab. *J. Phys. D Appl. Phys.* 2013, 46, 125107:1–125107:5.
- [4] *Baryshev A.V.; Merzliki, A.M.* Approach to visualization of and optical sensing by Bloch surface waves in noble or base metal-based plasmonic photonic crystal slabs *Applied Optics Volume* 2014, 53, 3142-3146
- [5] *Baryshev A.V.; Merzlikin A.M.* Plasmonic Photonic-Crystal Slabs: Visualization of the Bloch Surface Wave Resonance for an Ultrasensitive, Robust and Reusable Optical Biosensor *Crystals* 2014, 4, 498-508

СВЕРХИЗЛУЧЕНИЕ НЕДИКОВСКИХ СОСТОЯНИЙ

Н.Е. Нефедкин^{1,2}

¹ИТПЭ РАН

²МФТИ (ГУ)

Сверхизлучение (СИ) – это явление резкого увеличения скорости спонтанного излучения ансамбля независимых излучателей. Явление было предсказано Дике [1] для квантовых излучателей, находящихся в субволновом объеме. Дике было показано, что увеличение интенсивности излучения N двухуровневых систем достигается за время, пропорциональное логарифму числа излучателей. Пик сверхизлучения длится время в N раз меньшее, чем время излучения отдельного излучателя, а максимальная интенсивность излучения пропорциональна квадрату числа излучателей. В модели Дике предполагается, что атомы взаимодействуют друг с другом исключительно через ими же излученное поле. К сожалению, формальный подход Дике не позволяет понять физическую природу механизма СИ.

Экспериментально явление, схожее со сверхизлучением, наблюдали в протяжённых системах, линейный размер которых в одном из направлений был много больше длины волны. Однако интерпретация этих экспериментов неоднозначна вследствие вклада вынужденного излучения.

Обычно сверхизлучение трактуется как квантовый эффект, связанный с неразличимостью атомов [2]. Однако явление сверхизлучения имеет место и в классическом случае [3], в котором фазировка изначально нефазированных излучателей есть следствие конструктивной интерференции огибающих быстрых осцилляций нелинейных излучателей. В настоящей работе мы, следуя статье [3] и используя формализм матрицы плотности, постараемся вскрыть механизм эффекта сверхизлучения. Мы покажем, что СИ, как явление, имеет двойственную природу. С одной стороны, это случай, рассмотренный Дике. Здесь задержка пика сверхизлучения является квантовым эффектом. С другой стороны, возможна конфигурация изначально нефазированных излучателей, также реализующая сверхизлучение. В этом случае механизм квантового СИ аналогичен механизму классического.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Dicke R.H.*, Phys. Rev., vol. 93, 1954. P.99.
- [2] *Gross M., Haroche S.*, Phys. Rep., vol. 93, 1982. P.301.
- [3] *Vainstein L.A., Kleev A.I.*, Soviet Phys. – Doklady, vol. 35, 1990. P.359.

ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ АНИЗОТРОПНОГО ВЕЙЛЕВСКОГО ПОЛУМЕТАЛЛА С ПРИМЕСЯМИ

Я.И. Родионов¹, К.И. Кугель¹, F.Nori²

¹ИТПЭ РАН

²Center for Emergent Matter Science, RIKEN, Saitama, Japan

Вейлевские полуметаллы – это трехмерные аналоги графена, описываемые гамильтонианом Дирака с нулевой массой квазичастиц. Недавно было обнаружено несколько соединений этого класса. Электронный транспорт в них зависит от распределения и концентрации примесей, а также от их природы. Более того, в реальных вейлевских полуметаллах спектр носителей тока характеризуется одноосной анизотропией, то есть отношение фермиевских скоростей поперек оси и вдоль нее подчиняется $\xi = v_{\perp}/v_{\parallel} \neq 1$ условию

Нами была рассчитана проводимость анизотропного вейлевского полуметалла при достаточно общем виде потенциала примесей. Было показано, что отношения соответствующих компонент проводимости в различных предельных случаях описывается следующими формулами

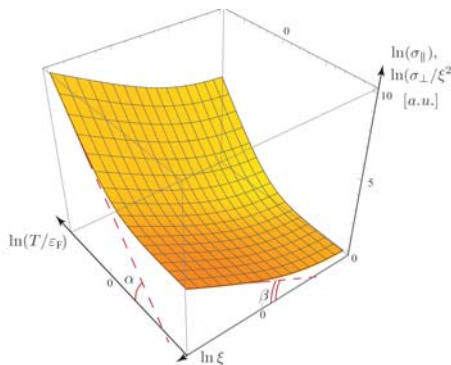


Рис. 1. Зависимость продольной и поперечной проводимости вейлевского полуметалла от температуры и параметра анизотропии.

$$\frac{\sigma_{\parallel} \xi^2}{\sigma_{\perp}} = \begin{cases} 3 / (\frac{1}{2} + 4 \ln 2) + \mathcal{O}(\xi^{-1}), & \xi \gg 1, \\ 1 + \mathcal{O}(\delta \xi^2), & \xi = 1 + \delta \xi, \quad \delta \xi \ll 1, \\ c_3 + \mathcal{O}(\xi^2), & \xi \ll 1, \end{cases}$$

где c_3 – константа порядка единицы.

В случае короткодействующего потенциала примесей поперечная и продольная компоненты проводимости имеют разную температурную зависимость. В случае же дальнедействующего потенциала примесей температурная зависимость ($\sim T^4$) оказывается нечувствительной к анизотропии (рис. 1) [1].

На эксперименте, например для Na_3Bi_7 и Cd_3As_2 , отношение компонент фермиевской скорости $\xi \approx 4$, т.е. анизотропия проводимости должна быть четко выражена ($\sim \xi^2$). Энергии Ферми лежат в интервале 100–1000 К, поэтому результаты, касающиеся температурной зависимости проводимости и проиллюстрированные на рис. 1, могут быть реализованы на эксперименте.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Ya.I. Rodionov, K.I. Kugel, F. Nori, Phys. Rev. B, vol. 92, 2015, id. 195117.

ЭЛЕКТРОННЫЕ СВОЙСТВА ПОДКРУЧЕННОГО ГРАФЕНА

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

¹ИТПЭ РАН

²QCMRG, RIKEN, Japan

В работе проводится расчет электронного спектра подкрученного графена в приближении сильной связи. Рассматриваемая система состоит из двух графеновых слоев, повернутых один относительно другого на некоторый угол θ . Используя численный алгоритм Lanczos диагонализации разреженных матриц, мы вычисляем электронный спектр двуслойки для широкого диапазона углов $1^\circ < \theta < 30^\circ$. Показано [1], что при некоторых углах θ , больших $\theta_c \approx 1.89^\circ$, спектр имеет щель, значение которой может достигать 80 meV. Именно такое значение щели соответствует недавним транспортным измерениям [2].

Нами было показано, однако, что в идеально чистом и бесконечно большом образце, щель в спектре не является непрерывной функцией угла подворота: она может существенно меняться при бесконечно малом изменении θ . Для образца конечных размеров щель непрерывно зависит от угла подворота.

Используя результаты расчетов, полученных в приближении сильной связи, мы конструируем эффективный Гамильтониан системы, справедливый при импульсах вблизи точки Дирака. Мы сравниваем полученный Гамильтониан с рассматриваемыми в литературе [3]. На следующем шаге, мы учитываем электрон-электронное взаимодействие, и показываем, что оно приводит к перенормировке щели согласно формуле

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

где Δ_0 – затравочная щель, а E_Λ - энергетический параметр, по порядку величины равный ширине зоны проводимости графена. Мы также исследуем возможность возникновения спонтанной экситонной щели, возникающей за счет кулоновского взаимодействия электронов. Рассмотрены различные возможные типы экситонного параметра порядка. В работе также анализируются вклады в квазичастичное затухание, как за счет различного рода дефектов, так и за счет электрон-электронного взаимодействия.

Для углов в диапазоне $\theta_c < \theta < 5^\circ$, щель в спектре оказывается пренебрежимо мала, и система представляет из себя полуметалл. При меньших углах подкрутки, $\theta < \theta_c$, расчеты, сделанные в приближении сильной связи, показывают, что в системе имеется поверхность Ферми. Однако энергетические зоны, пересекающие уровень Ферми, оказываются

достаточно плоскими. В результате, беспорядок или электрон-электронное взаимодействие могут приводить к локализации или открытию щели за счет возникновения какого-либо параметра порядка.

ЛИТЕРАТУРА

[1] *A.O. Sboychakov, A.L. Rakhmanov, A.V. Rozhkov, F. Nori*, Physical Review B vol. 92, 2015, P.075402.

[2] *J. Park, et al.*, Nature Communications, vol. 6, 2015, P.5677.

[3] *E.J. Mele*, Physical Review B, vol. 81, 2010, P.161405.

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ЭЛЕКТРОННЫЕ СВОЙСТВА СИСТЕМЫ С НЕИДЕАЛЬНЫМ НЕСТИНГОМ ПОВЕРХНОСТИ ФЕРМИ

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

ИТПЭ РАН

К системам с неидеальным нестингом поверхности Ферми относятся многие материалы, важные с точки зрения приложений и фундаментальной науки. Примеры таких электронных систем разнообразны. В частности, это хром и его сплавы, различные гексабориды, двухслойный графен с симметрией AA, высокотемпературные сверхпроводники на основе железа. Как было показано еще в ранних работах (см., например, [1]), одной из интересных особенностей систем с неидеальным нестингом является образование антиферромагнитных (АФМ) фаз с различной симметрией, в частности, так называемой несоизмеримой АФМ фазы. Нами было показано, что в рассматриваемых материалах возможно образование неоднородных состояний, вызванное эффектом так называемого электронного фазового расслоения [2-4]. Поскольку появление магнитного порядка является общим свойством систем с неидеальным нестингом, то возникает естественный вопрос, как повлияет на их свойства приложенное магнитное поле. Данный вопрос не получил адекватного освещения в литературе. Соответственно, без объяснения остается ряд экспериментальных исследований подобных материалов, предпринятых в последнее время. Нами проблема исследована в приближении, эквивалентном теории БКШ в сверхпроводимости. Показано, что в области не высоких магнитных полей при нарушении электрон - дырочной симметрии возникают АФМ состояния с двумя различными параметрами порядка, а также довольно сложная картина переходов между различными АФМ фазами, в том числе, и пространственно неоднородными. В области высоких полей, когда необходимо учитывать квантование Ландау, возникают характерные осцилляции величин АФМ параметров порядка. Полученные результаты могут служить основой для изучения конкретных материалов и интерпретации экспериментальных данных.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *T.M. Rice*, Phys. Rev. B, vol. 2, 1970, id 3619.
- [2] *A.L. Rakhmanov et al.*, Phys. Rev. Lett., vol. 109, 2012, id 206801.
- [3] *A.L. Rakhmanov et al.*, Phys. Rev. B, vol. 87, 2013, id 075128.
- [4] *A.O. Sboychakov et al.*, Phys. Rev. B, vol. 88, 2013, id 195142.

ДВУМЕРНОЕ УРАВНЕНИЕ ДИРАКА: ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ И КРАЕВЫЕ СОСТОЯНИЯ

А.В. Рожков

ИТПЭ РАН

В последнее десятилетие было обнаружено большое количество твердотельных систем, в которых низкоэнергетические свойства электронных квазичастиц хорошо описываются двумерным или трехмерным уравнением Дирака, с массовым членом или без него. К таким системам можно отнести графен [1], топологические изоляторы [2], высокотемпературные сверхпроводники [3] и другие вещества. Это делает изучение свойств уравнения Дирака в контексте теории физики конденсированного состояния весьма актуальным.

В данном докладе будет исследовано поведение дираковских систем вблизи края. Интерес именно к свойствам на границе связан с тем, что краевые состояния играют важную роль в физике рассматриваемых веществ (графен, топологически диэлектрики). Граничные условия для уравнения Дирака могут быть получены в самом общем виде исходя из условия самосогласованности гамильтониана Дирака. При этом оказывается, что уравнения, задающие граничные условия, зависят от единственного феноменологического параметра s . Мы покажем, что для почти любого значения этого параметра на границе дираковской системы существует зона краевых состояний. Детальные свойства краевой зоны зависят от значения s .

В заключении доклада развитый формализм будет применен для обсуждения свойств вейлевских полуметаллов и топологических диэлектриков.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *A.H. Castro Neto et al.*, Rev. Mod. Phys., vol. 81, 2009. P.109.
- [2] *M.Z. Hasan, C.L. Kane*, Rev. Mod. Phys., vol. 82, 2010. P.3045.
- [3] *A.V. Balatsky et al.*, Rev. Mod. Phys., vol. 78, 2006. P.373.

ДИНАМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ЛЭМБА В СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ СИСТЕМАХ С ДИССИПАЦИЕЙ

А.А. Жуков^{1,2}, Д.С. Шапиро^{1,3}, В.В. Погосов^{1,4}, Ю.Е. Лозовик^{1,5}

¹Всероссийский научно-исследовательский институт
автоматики им.Н.Л. Духова

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

³Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

⁴ИТПЭ РАН

⁵Институт спектроскопии РАН

Сверхпроводящие системы могут быть использованы для наблюдения и исследования нестационарных эффектов квантовой электродинамики в полости [1]. Это стало возможным благодаря впечатляющему прогрессу в методах изготовления сверхпроводниковых микроструктур и контроля их квантовых состояний, достигнутому за последние годы в контексте создания квантовых вычислительных систем. Так, несколько лет назад было заявлено о наблюдении динамического эффекта Казимира [2], существование которого было предсказано теоретически достаточно давно [3].

Другим нестационарным эффектом квантовой электродинамики в полости является динамический эффект Лэмба, который проявляется в параметрическом возбуждении атома за счет неадиабатического изменения сдвига Лэмба его энергетических уровней [4]. Изначально этот эффект был предсказан для атома в нестационарной полости, однако его более удобно наблюдать в связанной системе сверхпроводникового кубита и резонатора с динамически перестраиваемой связью [5].

В данной работе исследуется динамика такой системы с учетом диссипации энергии, которая всегда проявляется в реальных системах. Обычно диссипация приводит к подавлению квантовых эффектов. Однако в нашем случае она сопровождается появлением новых динамических режимов системы [6], в которых генерация возбуждений из вакуума может даже усиливаться. Это связано с тем, что в типичных системах сверхпроводниковых кубитов, встроенных в резонатор, диссипация, связанная со степенями свободы кубита, гораздо больше, чем диссипация, связанная с фотонными степенями свободы. Это может приводить к появлению нового канала генерации фотонов из вакуума через распад возбужденного состояния кубита.

В работе проведено исследование различных динамических режимов, которые могут существовать в данной системе, а также предложены способы

усиления динамического эффекта Лэмба. Полученные результаты должны быть полезны при проведении экспериментов по наблюдению и исследованию этого эффекта, а также сопутствующих квантовых эффектов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *P. D. Nation, J. R. Johansson, M. P. Blencowe, F. Nori // Rev. Mod. Phys.*, vol. 84, 2012. P.1.
- [2] *C. M. Wilson, G. Johansson, A. Pourkabirian, J. R. Johansson, T. Duty, F. Nori, P. Delsing // Nature*, vol. 479, 2011. P.376.
- [3] *G. T. Moore // J. Math. Phys.*, vol. 11, 1970. P.2679.
- [4] *A. M. Fedotov, N. B. Narozhny, Yu. E. Lozovik // Phys. Rev. A*, vol. 64, 2001. P.053807.
- [5] *D. S. Shapiro, A. A. Zhukov, W. V. Pogosov, Yu. E. Lozovik // Phys. Rev. A*, vol. 91, 2015, P.063814.
- [6] *A. A. Zhukov, D. S. Shapiro, W. V. Pogosov, Yu. E. Lozovik // arXiv:1603.02040*.

ДЛИТЕЛЬНЫЕ ВРЕМЕНА РЕЛАКСАЦИИ ФОТОВОЗБУЖДЕННЫХ НОСИТЕЛЕЙ ТОКА И ФОТОПРОВОДИМОСТЬ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ С ОРГАНИЧЕСКИМИ ДИПОЛЬНЫМИ МОЛЕКУЛАМИ

Y. Chen¹, Я.И. Родионов², К.С. Тихонов³, А.А. Захидов⁴, В.В. Подзорнов¹

¹Rutgers University, Piscataway, USA

²ИТПЭ РАН

³Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН

⁴University of Texas at Dallas, Richardson, USA

Гибридные (содержащие органические молекулы) материалы со структурой перовскита оказываются весьма перспективными для преобразования солнечной энергии в электрическую с КПД до 20% [1]. Исследование фотофизических характеристик таких систем находится пока на самом начальном этапе. Нами были проведены исследования стационарной фотопроводимости и эффекта Холла на тонкопленочных и монокристаллических образцах гибридных перовскитов $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ и $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$. Показано, что в широком интервале интенсивностей падающего света динамика фотовозбужденных носителей тока определяется бимолекулярным механизмом электрон-дырочной рекомбинации с очень низким коэффициентом рекомбинации, $\gamma \sim 10^{-11}-10^{-10} \text{ см}^3\text{с}^{-1}$, сравнимым с наблюдаемым в чистых неорганических полупроводниках с прямой энергетической щелью таких, как GaAs. Более того, время жизни носителей тока (до 30 мс) и их диффузионная длина (до 650 мкм), оказываются существенно большими, чем в даже высокочистых неорганических полупроводниках. Мы продемонстрировали, что эти особенности связаны с тем, что фотовозбужденные носители тока образуют поляронные состояния в среде дипольных молекул CH_3NH_3 . Были найдены характерные размеры таких поляронов и проанализирована динамика их релаксации [2].

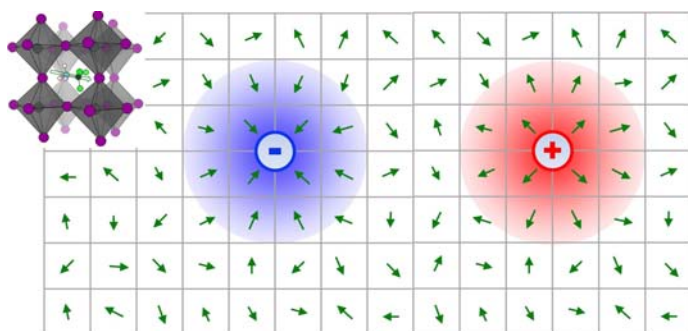


Рис. 1. Поляронные состояния, образующиеся в среде неупорядоченных дипольных органических молекул. Слева показана элементарная ячейка перовскита с молекулой CH_3NH_3 в центре.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] M. A. Green, A. Ho-Baillie, H.J. Snaith, Nature Photonics, vol. 8, 2014. P.506.
[2] Y. Chen et al., Nature Commun, in press.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ МАТЕРИАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ Fe-Al-Si

А.О. Ширяев, К.Н. Розанов, С.Н. Старостенко, В.А. Гаранов,

Д.А. Петров, А.Д. Мишин, Э.С. Жакина

ИТПЭ РАН

Известно, что сплавы Fe-Al-Si (альсиферы) при магнитной проницаемости до 30 000 имеют большую стойкость к окислению на воздухе при высоких температурах, чем Fe. Поэтому представляют интерес их магнитные свойства на СВЧ. В работе исследована зависимость СВЧ параметров композитных материалов на основе парафина и порошка Fe-Al-Si от размеров, формы (сферической или пластинчатой), объемного содержания порошка и напряженности внешнего постоянного магнитного поля. Измерения материальных параметров проведены в проходной коаксиальной ячейке в диапазоне частот 0,1 – 20 ГГц. Пример измеренных магнитных спектров образцов с пластинчатыми частицами представлен на рис. 1. По концентрационным и частотным зависимостям магнитной проницаемости композитов с учетом распределения по размерам и форме частиц восстановлен спектр наполнителя.

Оценена применимость исследуемых порошков для работы при высоких температурах. Показано, что наполнитель стоек к окислению до 600°C и работоспособен до 450°C без заметного уменьшения магнитной проницаемости.

Оценена работоспособность альсифера в качестве наполнителя для радиопоглощающего покрытия в метровом диапазоне длин волн. Расчетом и прямыми измерениями показано, что при толщине покрытия 4,4 мм и весе 8,6 кг/м² композит, содержащий ~20 % пластинчатого альсифера, перекрывает полосу частот от 0,45 до 0,75 ГГц при уровне отражения - 10 дБ.

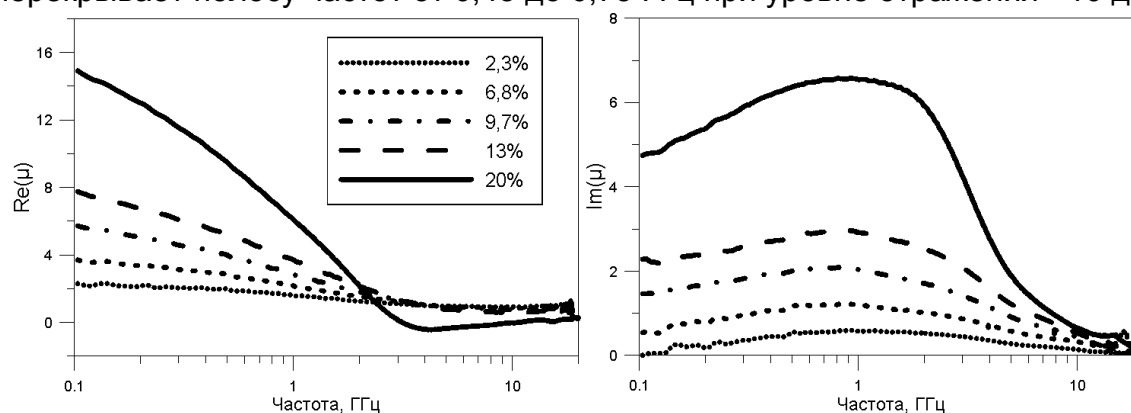


Рис. 1 Частотные зависимости магнитной проницаемости композитного материала. Объемное содержание наполнителя указано во врезке.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ МАТЕРИАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОРОШКОВ SiC В СВЧ ДИАПАЗОНЕ

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

ИТПЭ РАН

Полупроводниковые материалы, в частности, SiC, обладают ярко выраженной температурной зависимостью диэлектрической проницаемости, что может быть использовано при создании эффективных радиопоглощающих покрытий и материалов в соответствующем рабочем диапазоне температур. При изменении температуры в пределах от комнатной до 1000°C проводимость большинства полупроводников может изменяться на несколько порядков. Отличительной особенностью вырожденного SiC является то, что он обладает относительно слабой температурной зависимостью, приводящей к изменению его проводимости лишь в несколько раз. В сочетании с высокой прочностью и термостойкостью (температура плавления 2730°C), а также стойкостью к окислению это делает SiC перспективным наполнителем для создания высокотемпературных радиопоглощающих покрытий и материалов.

В работе приведены результаты экспериментальных исследований СВЧ диэлектрических спектров композитных материалов на основе промышленных порошков SiC. Измеренные частотные зависимости диэлектрической проницаемости $\epsilon' + i\epsilon''$ для различных температур одного из образцов SiC приведены на Рис. 1.

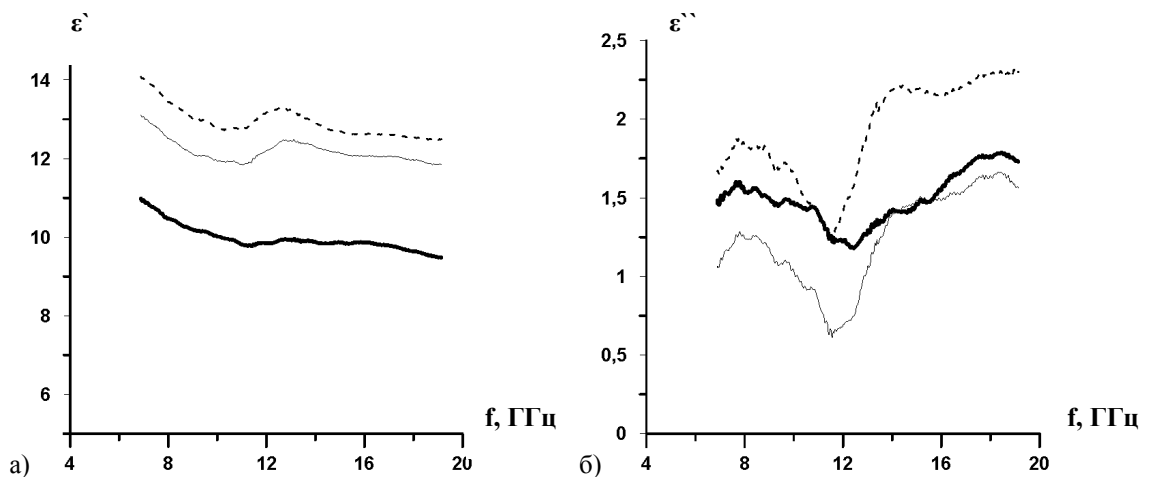


Рис.1 Измеренная температурная зависимость частотного спектра вещественной (а) и мнимой (б) диэлектрической проницаемости одного из порошков SiC при 20°C (черная линия), при 600°C (серая линия) и при 1200°C (пунктирная линия).

Получены зависимости параметров диэлектрических спектров композитных образцов от размера частиц порошка SiC и его концентрации, от температуры, а также от напряженности внешнего статического электрического поля. Оценена возможность применения порошков SiC в высокотемпературных радиопоглощающих покрытиях и материалах сантиметрового диапазона длин волн. Продемонстрирована принципиальная возможность создания управляемого радиопоглощающего материала на основе порошков SiC.

ИЗМЕРЕНИЕ МАТЕРИАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ В ПРЯМОУГОЛЬНОМ ВОЛНОВОДЕ

С.Ю. Бобровский, А.В. Осипов, Д.А. Петров, К.Н. Розанов
ИТПЭ РАН

Актуальность разработки новых эффективных магнитных материалов для диапазона УВЧ (от 0,3 до 3 ГГц) непрерывно растет, что вызывает необходимость разработки методов измерения материальных параметров в этом диапазоне. Для ряда практических применений представляет интерес интервал частот от 0,3 до 0,5 ГГц.

Существует несколько различных методов, позволяющих измерять материальные параметры образцов, например, метод Николсона-Росса-Уира с TRL калибровкой. Стандартным подходом является реализация этого метода в коаксиальной линии или в микрополосковой ячейке. Однако, в случае зависимости свойств образцов от формы, требуется бóльшая рабочая поверхность, имеющая, по возможности, прямоугольную форму. Всем этим условиям удовлетворяет прямоугольный волновод стандарта R3 размера 584x292 мм².

Были разработаны методики, позволяющие проводить измерения в волноводе с полной TRL калибровкой, а также с частичной калибровкой по одному эталонному образцу, и проведен анализ погрешностей измерений. На рис. 1 представлена измеренная частотная зависимость диэлектрической проницаемости образца

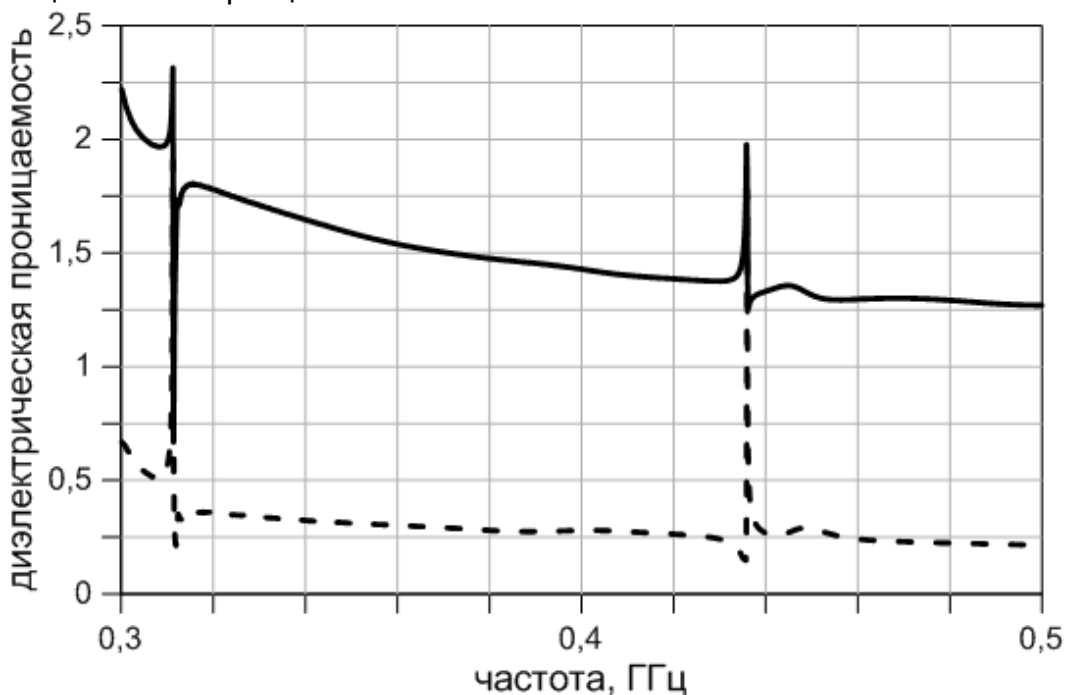


Рис. 1. Измеренная частотная зависимость диэлектрической проницаемости образца на основе поролона

на основе поролонa с проводящей пропиткой. На рис.2 показана частотная зависимость свойств образцов на основе пленок пермаллоя при различных толщинах, иллюстрирующая влияние размагничивания на магнитные свойства. Магнитная проницаемость образца толщиной 0.7 мм выделена черным цветом, образца толщиной 2.8 мм – серым. На обоих рисунках действительные части материальных параметров изображены сплошными линиями, мнимые – пунктирными.

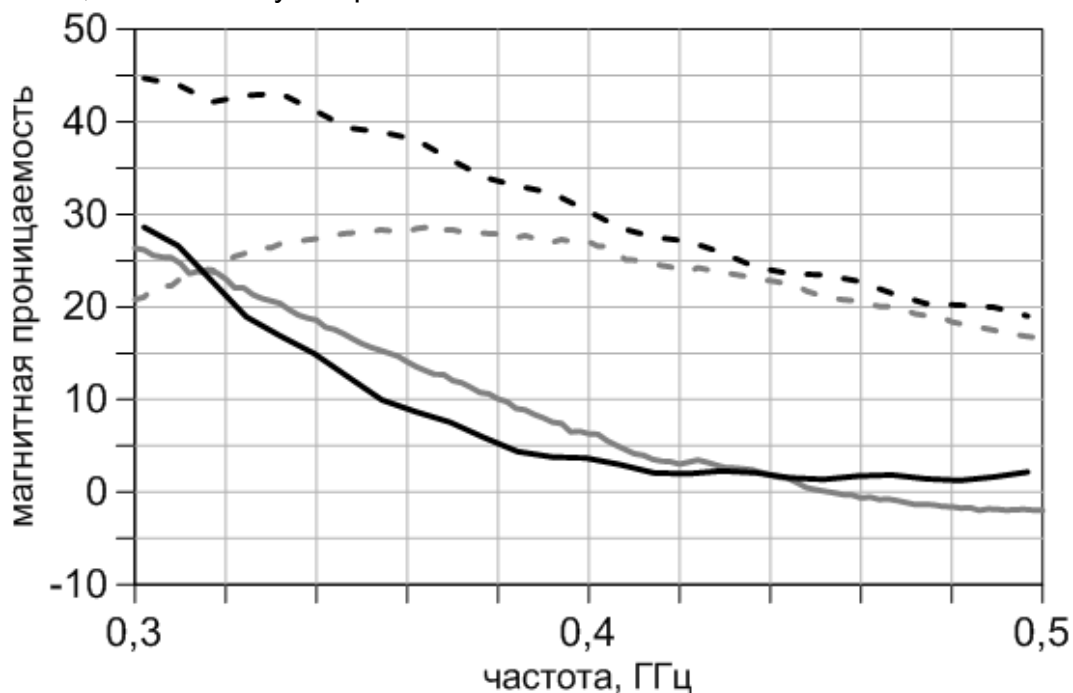


Рис. 2. Измеренная частотная зависимость магнитной проницаемости образцов на основе пленок пермаллоя

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОСТАВОВ В КОМПОЗИТНОЙ СИСТЕМЕ Fe@SiO₂-ПАРАФИН

Ю.А. Адамович^{1,2}, С.С. Маклаков¹, С.А. Маклаков¹, И.А. Рыжиков¹,
Д.С. Филимонов³, Д.А. Петров¹, К.Н. Розанов¹,
В.А. Гаранов¹, А.Ю. Зарубина¹

¹ИТПЭ РАН

²МФТИ (ГУ)

³МГУ имени М.В. Ломоносова, Химический факультет

Как было показано ранее, нанесение покрытия SiO₂ толщиной 50 нм на поверхность порошка карбонильного железа со средним размером частиц ~4 мкм не изменяет магнитной мягкости материала и повышает его термостойкость. В докладе рассмотрены диффузионные барьерные свойства покрытия SiO₂ и электродинамические характеристики композитов из системы Fe@SiO₂-парафин.

Известно, что тонкий активный слой SiO₂ может взаимодействовать с железом. Ионы Fe²⁺ образуют с SiO₂ силикат Fe₂SiO₄. При температуре выше 500°C наблюдается диффузия Fe через SiO₂. Слой SiO₂ служит диффузионным барьером только в случае сплошности и малого количества дефектов. Синтезированные через модифицированный метод Штобера образцы Fe@SiO₂ демонстрируют высокую коррозионную устойчивость относительно исходного порошка: отсутствие признаков коррозии Fe@SiO₂ в 5% растворе NaCl в течение более чем 3-х недель. Данные наблюдения говорят о равномерности покрытия поверхности Fe плёнкой SiO₂.

Гамма-резонансная спектроскопия Fe@SiO₂ показывает отсутствие изменений в железе при нанесении покрытия SiO₂. Отжиг такого порошка при 300°C на воздухе в течение часа приводит к образованию силиката, образованию поверхностного тёмно-синего оксида железа Fe₃O₄ и рекристаллизации металлического Fe. Это означает, что нанесённый тонкий слой служит барьером для диффузии железа и кислорода, но это свойство ухудшается при нагреве. Порошок, подвергнутый отжигу, оказывается неустойчив к коррозии в растворе электролита. По-видимому, основной причиной ухудшения барьерных свойств при нагреве является растрескивание стеклянной оболочки.

Для измерения электродинамических характеристик порошка изготавливали композит с парафином. Однородный композит получали нагреванием смеси навесок порошка и парафина на магнитной мешалке до расплавления парафина, при вращении магнитного элемента, затем охлаждали до отверждения. Полученный материал формовали требуемым способом. Частотные дисперсии мнимой и действительной частей магнитной

и диэлектрической проницаемостью получали при помощи метода Николсона-Росса в коаксиальной линии. Полученные композиты обладают низким значением ϵ' (не более 13) при квазистатическом значении μ' порядка 4. С ростом содержания наполнителя наблюдается одинаковый прирост значений ϵ' и μ' , что практически важно. В отличие от композитов с Fe, образцы с синтезированным Fe@SiO₂ показывают отсутствие статической электрической проводимости при достижимых составах. Полученный порошок обладает худшей смешиваемостью с парафином по сравнению с исходным карбонильным железом: композит теряет пластичность уже при 88 масс. % наполнителя. Для Fe данный показатель превышает 90%. Особой проблемой при работе с полученным порошком является присутствие частиц SiO₂, образующихся в качестве побочного продукта в использованном синтезе. Присутствие стеклянных шариков является причиной ухудшения механических свойств композита и приводит к занижению квазистатического значения μ' .

Развитие работы будет заключаться в более эффективном выделении магнитного порошка из смеси Fe@SiO₂ – SiO₂ и получении композитов с составами, близкими к перколяции, предсказываемыми при помощи формул смешения из электродинамической теории.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект №16-33-01089)

СТРУКТУРИРОВАННЫЕ ПЛЕНКИ СЕРЕБРА, ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО ИСПАРЕНИЯ

**А.С. Бабурин¹, А.Р. Габидуллин¹, И.А. Богинская², А.В. Зверев¹,
Ю.В. Панфилов¹, С.С. Маклаков², И.А. Родионов¹, И.А. Рыжиков²**

¹НОЦ «Функциональные микро/наносистемы»

²ИТПЭ РАН

Серебро, благодаря соотношению между действительной и мнимой частями диэлектрической проницаемости, обладает малыми оптическими потерями в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах длин волн, что делает его одним из наиболее применимых в оптике и плазмонике [1]. Высококачественные пленки серебра могут быть получены методами испарения [2], импульсного лазерного нанесения [3], магнетронного нанесения [4], гальваники [5].

Основной проблемой является получение абсолютно сплошной пленки, обладающей нанометровой гладкостью. Необходимо ввести критерий, по которому мы будем считать пленку соответствующей данным требованиям. В качестве такого критерия будем использовать аспектное соотношение размера кристаллита с толщиной пленки. При обзоре литературы установлено, что авторы используют критерий от 1 [6] до 20 [7] для пленок толщиной в несколько десятков нанометров. Так как нашей задачей является получение сплошной пленки, что накладывает ограничения на минимальную толщину, то будем считать такими пленки с аспектным соотношением 5 и более. Фактически они являются квазиоднокристаллическими.

Для получения гладких пленок необходимо представлять основные зависимости характеристик пленки от режимов нанесения. Существующие модели роста не позволяют получить универсальную зависимость роста пленки от эмпирических факторов. Необходимо определить зависимость роста пленки от факторов, которые могут быть заданы непосредственно в процессе её нанесения. Как основные факторы, влияющие на рост пленки, выделены скорость осаждения и температура подложки. Скорость осаждения определяет количество поступающих на поверхность атомов и атомных кластеров и, косвенно, их энергию. Температура подложки определяет распределение поверхностной энергии (плотность поверхностных состояний), что оказывает прямое влияние на длину диффузии адатомов по поверхности подложки, а также на коэффициент прилипания частиц.

Проведен ряд экспериментов с варьированием скорости нанесения от 0,5 до 150 Å/с и температуры подложки от 21 до 520°C. Сформированные пленки исследованы методами электронной и атомно-силовой микроскопии.

Электронная микроскопия позволяет провести экспресс-анализ для микронных размеров, а на больших увеличениях наблюдать структуру с разрешением до единиц нанометров.

В результате проведенных экспериментов определены режимы нанесения для получения сплошных пленок с размерами кристаллитов от десятков нанометров до единиц микрон. Получены зависимости размеров кристаллитов и их формфакторов от скорости осаждения и температуры подложки.

Предложена кинетическая модель роста пленки. Увеличение размера кристаллита объяснено увеличением длины поверхностной диффузии материала с ростом температуры подложки. Снижение разнотолщинности пленки с ростом скорости осаждения связано с увеличением количества зародышей и появлением заметного трехмерного роста.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Paul R. West, Satoshi Ishii, Gururaj V. Naik, Naresh K. Emani, Vladimir M. Shalaev, and Alexandra Boltasseva.* Laser Photonics Rev. 4. No. 6. pp. 795–808. 2010.
- [2] *M. Levlin, A. Laasko.* App. Surf. Science. 171. pp 257-264. 2000.
- [3] *Jeffrey M. Warrender, Michael J. Aziz.* Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 749. 2003.
- [4] *T. B. Hur, H. K. Kim, D. Perello, M. Yun, A. Kulovits, and J. Wiezorek.* Journal Of Applied Physics. Vol 103. No 10. 103507. 2008.
- [5] *Sayed Youssef Sayed.* CrystEngComm. 16. 10028-10033. 2014.
- [6] *D.D. Sneddon, A.A. Gewirth.* Surface Sci. 343. p. 185. 1995.
- [7] *A.A. Baski, H. Fuchs.* Surface Sci. 313. p. 275. 1994.

ПОЛУЧЕНИЕ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЁНОК VO₂ ПРИ ПОМОЩИ РЕАКТИВНОГО МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ И ОТЖИГА

В.И. Полозов^{1,2}, С.С. Маклаков¹, С.А. Маклаков¹, И.А. Рыжиков¹,
В.А. Амеличев³, В.Н. Кисель¹

¹ИТПЭ РАН

²МФТИ (ГУ)

³ЗАО «СуперОкс»

Тонкие эпитаксиальные плёнки оксида ванадия (IV) скачкообразно изменяют сопротивление на 4 порядка при 67°С. При экранировании такими плёнками СВЧ излучения частотой 9 ГГц, относительный коэффициент ослабления интенсивности излучения составляет ~20 дБ. Качество эпитаксиальных плёнок критически важно для контраста сопротивления. Представляет интерес изучение вопроса о максимальном контрасте сопротивления, достижимом при использовании технически более простого способа получения плёнок, чем эпитаксиальный процесс.

Для получения плёнок VO₂ использовали двухстадийный подход: реактивное ВЧ магнетронное распыление металла с осаждением на г-плоскость кристалла сапфира с последующим фазообразующим отжигом. Реактивный процесс приводит к получению однородных покрытий чёрного или жёлтого цвета. Цвет плёнки определяется парциальным давлением кислорода в газовой смеси и электрическим смещением при нанесении. Переход между состоянием оксида пороговый и происходит при ~15% Ar. Желтый цвет свидетельствует об образовании переоксидного соединения. Плёнки чёрного цвета получают при распылении с парциальным давлением кислорода 3-15 %. С ростом содержания кислорода возрастает электрическое сопротивление плёнок. Механизм такого превращения не изучен.

Для отжига использованы покрытия чёрного цвета. Условия отжига, 720°С в токе аргона марки 4.4, с потоком 200 л/час, в течение часа, выбраны, исходя из изотермы перитектической реакции $V_6O_{13} \rightleftharpoons VO_2 + L$ при 700°С для предотвращения переоксидации. Отжиг приводит к формированию нанокристаллов VO₂ с размером не более 100 нм. Получение требуемой фазы подтверждается рентгенофазовым анализом. Последовательный циклический отжиг увеличивает размеры кристаллов оксида и увеличивает контраст сопротивления плёнки. Наилучшее полученное значение отношения сопротивлений в металлическом и диэлектрическом состояниях $R_{мет}/R_{диэл} = 30$ при ширине перехода 10°С. Данный переход обеспечивает коэффициент экранирования излучения 9 ГГц в 3 дБ. Ранее показано, что использование отжига в низком вакууме без тока инертного газа не позволяет получить VO₂.

Использование аргона марки 5.6 (более высокой частоты) не повышает качества плёнок.

С помощью отжига можно получить плёнки VO_2 с невысоким контрастом сопротивлений из плёнок реактивных оксидов ванадия с недостатком по кислороду. Данный метод не требует точного контроля атмосферы в реактивном процессе и вакуумной техники при отжиге. Дальнейшая работа будет заключаться в изучении возможности применения поликристаллической подложки вместо монокристаллической.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-33-01089).

ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ ПОЛИПАРАКСИЛИЛЕН-СЕРЕБРО

И.А. Богинская¹, А.В. Гусев¹, К.А. Маилян¹, И.А. Родионов¹, М.В. Седова¹,
И.А. Рыжиков¹, И.В. Трофимов¹

ИТПЭ РАН

Металлополимерные наноконпозиты являются перспективными материалами для создания покрытий с заданными оптическими свойствами и конформных к поверхностям с развитой морфологией. Электрофизические и оптические свойства таких материалов определяются размерами включений наночастиц, их формой, формфактором и видом распределения наночастиц в полимерной матрице. При формировании наноконпозитов необходимо учитывать влияние наночастиц на полимерную матрицу, так как их введение приводит к изменению структурных свойств и химического состава полимера.

В предыдущих работах авторов для исследования микроструктуры использовали методы малоуглового рентгеновского рассеяния, просвечивающей электронной микроскопии, оптической спектроскопии, анализа индикатрисы светорассеяния в оптическом диапазоне. В данной работе исследовались спектры флуоресценции наноконпозитов для определения корреляций с микроструктурой, составом, характером, распределения наночастиц в наноконпозите.

В работе исследовались наноконпозиты с содержанием наночастиц серебра 2, 4, 7, 8, 11 об.% и чистый полипараксилилен как материал матрицы, нанесенные на кремниевые подложки. Спектры флуоресценции получали, возбуждая образцы излучением с длиной волны 350 нм. При введении в полимерную матрицу наночастиц металла наблюдали не только общее уменьшение интенсивности излучения полимера, но и изменение спектра. Было обнаружено уменьшение интенсивности полосы флуоресценции при 447 нм при росте содержания наночастиц серебра от 4 об.% до 7 об.% и ее рост при увеличении содержания серебра от 8 об.% до 11 об.%. Интенсивность полосы при 504 нм менялась противоположным образом: наблюдали уменьшение интенсивности при росте содержания наночастиц серебра от 4 об.% до 7 об.% и ее рост, начиная от 8 об.% до 11 об.%. Это явление объясняется влиянием наночастиц металла на химический состав полимерной матрицы. Полоса при 447 нм обусловлена переходом в основное состояние из триплетного заряженного комплекса на бензольном кольце [1]. Вторая по интенсивности полоса может быть связана с существованием в полимере стильбеновых соединений, появляющихся в полимере вследствие незавершенности реакции полимеризации [2]. Остальные слабоинтенсивные полосы могут быть вызваны эксимерной

фосфоресценцией полимера.

ИК Фурье спектроскопию использовали для анализа химического строения нанокompозита, при введении в полимерную матрицу наночастиц металла обнаружили наличие алкильных групп, двойных связей, что говорит о наличии дефектов в полимерной матрице.

Таким образом, показано, что соотношение линий в спектре фотолюминисценции, связанных с определенным типом дефектов зависит от концентрации наночастиц серебра.

Предложена эмпирическая модель, связывающая строение композита с его энергетической структурой.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Yo. Takai, J.H. Calderwood. Luminescence from Poly(p-xylylene) / Makromol. Chem., Rapid Commun., 1980. 1. PP. 17-21.*
- [2] *R.N. Nurmukhametov, S.N. Dyadyushkina, K.A. Mailyan, A.M. Sergeev, A.V. Pebalk and I.Ye. Kardash. Nature of the absorption and luminescence centres in films of poly-p-xylylene // Polymer Science. 1991. Vol. 33. No 7. PP. 1416-1420.*

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ НАНЕСЕНИЯ ТОКОПРОВОДЯЩЕГО СЛОЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО НАГРЕВАТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ПЛЕНОЧНОГО ТИПА ДЛЯ ВТОРИЧНОГО ЗЕРКАЛА ТЕЛЕСКОПА КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ Т-170М

А.В. Гусев¹, С.В. Карпов², К.А. Маилян¹, И.А. Рыжиков¹, М.В. Седова¹

¹ИТПЭ РАН

²МФТИ (ГУ)

Для оптимизации конструкции нагревательного элемента было проведено компьютерное моделирование трех разных форм токопроводящего покрытия, что позволило определить оптимальную форму, обеспечивающую минимальную неравномерность температурного поля нагревателя (рис.1).

Для нанесения токопроводящего покрытия методом магнетронного распыления была переоборудована вакуумная установка «Оратория-9». На установке проведена серия экспериментов со стеклами для определения параметров работы магнетрона и условий равномерного напыления слоя. Неравномерность по толщине напыляемого слоя составила не более 15%.

Разработано устройство, позволяющее контролировать величину электрического сопротивления нагревательного элемента непосредственно в процессе нанесения токопроводящего слоя, что обеспечило воспроизводимость характеристик наносимого покрытия.

Изготовлены опытные образцы нагревателей с неравномерностью температурного поля не более 3⁰С.

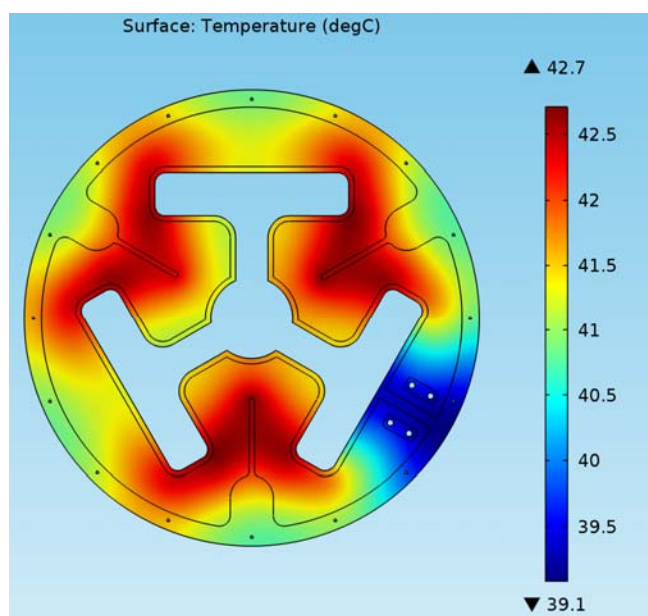


Рис.1 Температурное поле нагревательного элемента с оптимальным рисунком токопроводящего покрытия

ВЛИЯНИЕ ВЫСШИХ МОД В КОАКСИАЛЬНОМ ВОЛНОВОДЕ НА ИЗМЕРЕНИЯ МАТЕРИАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Д.А. Петров, К.Н. Розанов

ИТПЭ РАН

При измерениях СВЧ материальных параметров композитных материалов в коаксиальном волноводе, в зависимости от материальных параметров и качества поверхности образца возможно возникновение и распространение высших типов волн в образце. Так как оптическая плотность материала образца больше, чем у воздуха, заполняющего измерительную линию, то частота отсечки высших мод, распространяющихся в материале образца, ниже, чем в случае свободной линии. Для волновода 7/3, критическая частота, при которой могут распространяться высшие моды в материале образца, располагается ниже 18 ГГц. При анализе измеренных частотных зависимостей материальных параметров важно отличать полуволновой резонанс, возникающий на основной моде от резонансов, характерных для высших мод.

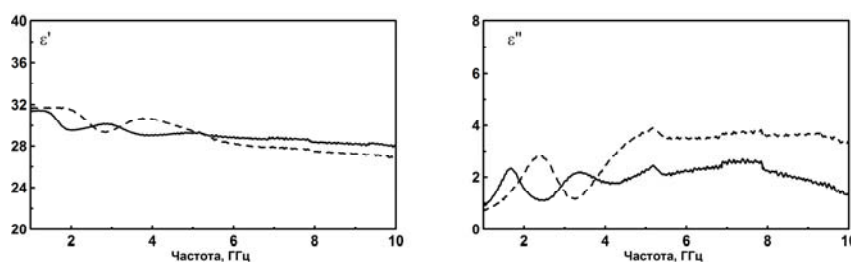


Рис.1 Измеренные частотные зависимости действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости образцов композитного материала на основе частиц железо-кремний и парафина в качестве диэлектрической матрицы. Толщина образца составляла 9.4 мм (сплошная линия) и 6.4 мм (пунктир).

На рисунке показано, что с уменьшением длины образца композитного материала резонансные максимумы смещаются в область высоких частот. Первый резонанс, полуволновой на основной моде, сместился пропорционально уменьшению длины образца, в то время как более высокочастотный сместился сильнее. Одновременно наблюдается уменьшение добротности резонансов.

Это может объясняться как наличием частотной дисперсии магнитной проницаемости образца, при распространении основной моды, так и дисперсией высших мод.

РАСЧЕТ РАССЕЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН ПОЛОСТЬЮ С РАСТРУБОМ

В.Н. Кисель

ИТПЭ РАН

Одним из узлов, создающих основной вклад в рассеянное поле в передней полусфере самолета, является воздухозаборник (ВЗ) с установленным в его канале турбореактивным двигателем. Ранее в ИТПЭ РАН была разработана электродинамическая модель ВЗ сверхзвукового самолета в виде вытянутой полости с достаточно произвольной формой поперечного сечения и, возможно, покрытием на стенках, полость могла содержать и систему пластин, имитирующих элементы первой ступени двигателя [1-3]. Главное ограничение модели – характерный размер ВЗ (в длинах волн), поскольку время расчета и требуемый объем оперативной памяти резко растут по мере его увеличения. Для смягчения этих ограничений был разработан гибридный подход (сочетание интегральных соотношений для полей, принципа Кирхгофа и метода физической оптики с итерационным уточнением решения [4]), в рамках которого применено разбиение полости на отдельные фрагменты (секции). Экономия ресурсов ЭВМ была получена за счет того, что последовательное прохождение электромагнитной волны по секциям канала, дифракция волны на системе пластин и обратное прохождение волны в направлении входного отверстия ВЗ рассчитывались относительно независимо друг от друга.

Тщательное тестирование и длительная практика расчетов подтвердили вычислительную эффективность и достаточно высокую точность модели применительно к каналам, поперечное сечение которых не очень сильно изменяется вдоль длины, что характерно для сверхзвуковых самолетов. Однако некоторые летательные аппараты имеют иную форму канала, с воронкообразным входом (раструбом) с большим отношением поперечного размера входной части к среднему диаметру канала. В таких раструбах при некоторых ракурсах облучения может возникать значительное отражение волны от стенок канала, направленное ко входному отверстию полости, и его необходимо учитывать наряду с отражением волны от торца полости (двигателя самолета).

Для учета дополнительного отражения от стенок воронкообразной полости (секции воздушного канала) описанная выше модель была доработана. Суть доработки состоит в том, что при расчете прохождения волны сквозь каждую секцию канала происходит расчет не только эквивалентных токов и полей на стенках и выходном сечении секции, но и определяются поля, создаваемые на входном сечении секции. Значения

эквивалентных электрических и магнитных токов для этих полей хранятся в памяти ЭВМ, при обратном распространении волны (от торца канала) они рассматриваются как дополнительные источники облучения соответствующей секции или (для входной секции) – как источники, создающие дополнительное поле во внешнем пространстве. В результате точность расчета рассеяния на полостях с раструбом удается значительно повысить.

В докладе рассматриваются особенности реализации вычислительного алгоритма, приводятся примеры расчетов для конкретных конфигураций воздушного канала, делаются выводы об особенностях формирования рассеянного поля и необходимости учета волн, отраженных от стенок канала, в зависимости от формы полости.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *V.N. Kisel', A.I. Fedorenko*. Electromagnetic scattering from cavities with complex objects inside//Conf. Proc. 2000 Int. Conf. on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET2000), Kharkov, Ukraine, Sept. 11 15., 2000. V.2. P.447-449.
- [2] *V.N. Kisel', A.I. Fedorenko*. Electromagnetic modeling of the jet aircraft intake with the interior impeller// Conf. Proc. 2002 Int. Conf. on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET*02), Kiev, Ukraine, Sept. 10 13, 2002. V.2. P.508-510.
- [3] *Кисель В.Н.* Расчет отражения электромагнитной волны от входного устройства авиационного двигателя // Пятнадцатая ежегодная научная конференция ИТПЭ РАН при поддержке IEEE-APS-LEOS-CHAPTER. Сборник тезисов докладов. Под редакцией д.ф.-м.н. В.Н. Киселя – М.: ИТПЭ РАН. 2014. С. 42.
- [4] *F. Obeleiro-Basteiro, J.L. Rodrigues, R.J. Burkholder*. An iterative physical optics approach for analyzing the electromagnetic scattering by large open-ended cavities// IEEE Trans. Antennas and Propag. V.AP-43. No.4. P.356-361. 1995.

ЧАСТОТНО-СЕЛЕКТИВНЫЕ СТРУКТУРЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ДИАГРАММЫ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ ЛИНЕЙНОЙ ФАР L ДИАПАЗОНА

А.И. Синани¹, Г.Ф. Мосейчук¹, А.Ю. Гринев², А.П. Волков^{2,3}

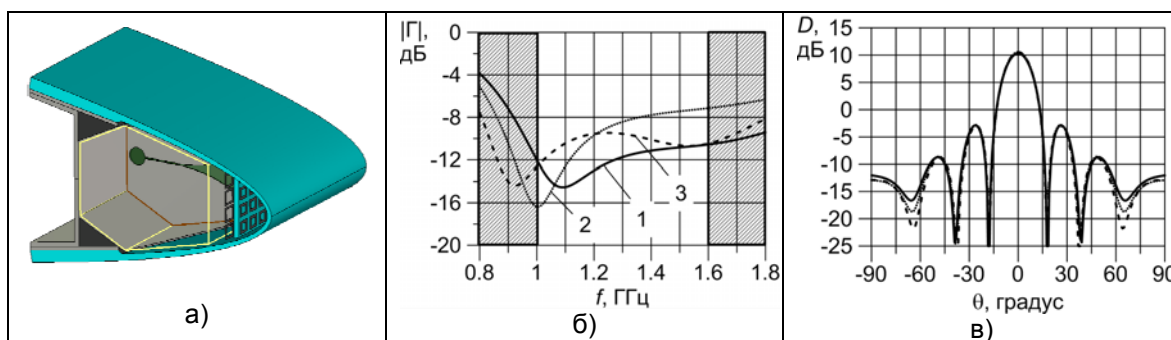
¹НИИП им. В.В. Тихомирова

²МАИ (НИУ)

³АО «Концерн «Вега»

Известно, что радиолокационная заметность планера определяется в основном его сильно отражающими элементами: воздухозаборниками двигателей, фюзеляжем, крыльями и др. Антенны, в частности ФАР, относятся к таким сильно отражающим элементам [1]. Зависимость моностатической характеристики рассеяния (при условии совпадения направлений от рассеивателя на источник зондирующего сигнала и на точку наблюдения) от угловых координат называют диаграммой обратного рассеяния (ДОР).

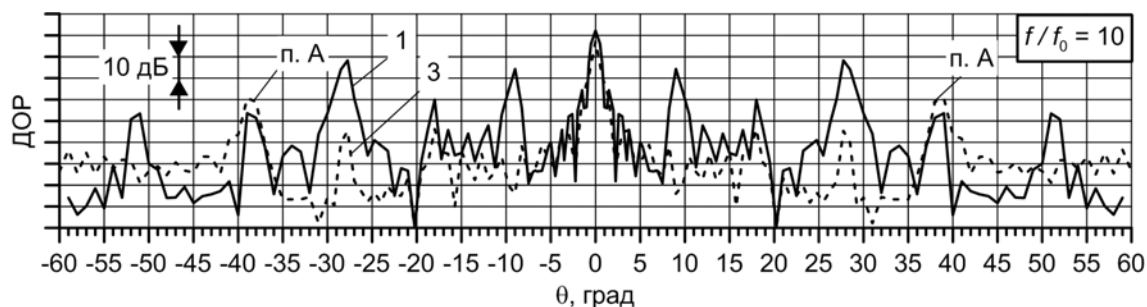
В докладе представлены результаты моделирования ДОР линейной ФАР L-диапазона, размещаемой в отклоняемом носке крыла, при облучении плоской волной в полосе частот X и Ku диапазонов. В качестве широкополосного элемента ФАР L-диапазона выбрана одна из модификаций неоднородного металлодиэлектрического излучателя (МНИ), состоящего из металлического основания и металлического экрана, внутри которых установлена трехслойная печатная плата. Для контроля ДОР линейной ФАР L-диапазона разработана двухслойная полосно-заграждающая ЧСС [2] на основе печатных прямоугольных кольцевых элементов с полосой рабочих частот 8-18 ГГц. Рассмотрен случай размещения ЧСС перед апертурой ФАР на расстоянии $0.04\lambda_{AP}$ (рис.1 а). Приведены результаты моделирования характеристик ФАР совместно с ЧСС в виде зависимостей КСВ от частоты (рис.1 б), а также в виде диаграмм направленности для различных углов фазирования луча (рис.1 в).



1 – ФАР без ЧСС, 2 – ФАР с ЧСС, 3 – оптимизированная ФАР с ЧСС

Рис. 1. ФАР с ЧСС: а) – общий вид, б) – КСВ, в) – ДН на частоте 1.3 ГГц.

Анализируется применение ЧСС для снижения величины брэгговских лепестков ДОР (рис 2). Показано, что использование ЧСС позволяет снизить среднее значение ДОР в диапазоне углов $6.5^\circ - 56.5^\circ$ в полосе частот 8 – 18 ГГц в 2-8 раз. Выявлено частичное подавление отдельных брэгговских лепестков на некоторых частотах рабочего диапазона ЧСС и углах падения зондирующей волны (например, на частоте $f / f_0 = 10$ при угле падения плоской волны $\theta = 38^\circ$ – п.А) обусловленного тем, что небольшая фракция зондирующей волны всегда проходит сквозь полосно-заграждающую ЧСС в виде периодических затухающих и распространяющихся гармоник Флоке. Последние отражаются от проводящего экрана, а затем и от ЧСС. При определённых расстояниях между ЧСС и экраном возникает резонанс, на той периодической гармонике ЧСС, которая его вызвала (аналогично резонатору Фабри-Перо) [3]. Усиленное электромагнитное поле, соответствующее "резонансной" гармонике рассеивается на периодической структуре ФАР, и излучается через ЧСС, тем самым ослабляя полосно-заграждающие свойства ЧСС для некоторых брэгговских лепестков. Для устранения указанного эффекта необходимо уменьшать расстояние от ЧСС до проводящего экрана, а также использовать поглощающие материалы.



1 – ФАР без ЧСС, 3 – оптимизированная ФАР с ЧСС

Рис. 2. ДОР линейной ФАР L-диапазона.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *E.F. Knott, J.F. Shaeffer, and M.T. Tuley*, Radar cross section. Raleigh, NC, USA: Scitech Pub., 2004.
- [2] *B.A. Munk*, Frequency-Selective Surfaces: Theory and Design. New York, NY, USA: Wiley, 2000.
- [3] *F. Capolino (ed.)*, Metamaterials Handbook: Applications of Metamaterials. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2009.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕРКАЛЬНОГО КОЛЛИМАТОРА С ИМПЕДАНСНЫМИ СКРУГЛЕННЫМИ КРАЯМИ

Ф.Б. Хлебников¹, А.Н. Боголюбов¹, Н.Е. Шапкина^{1,2}, Д.А. Коняев^{1,2}

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

²ИТПЭ РАН

Для целого ряда практически важных экспериментов, относящихся к прикладной электродинамике, в частности, измерения ЭПР исследуемого объекта, необходимо решить задачу получения плоской электромагнитной волны в заданном объеме пространства. Использование открытых полигонов для получения плоской волны осложняется наличием большого количества помех и влиянием погодных условий. Этих недостатков лишены компактные полигоны, представляющие собой измерительный стенд, состоящий из безэховой камеры и оборудования, физически моделирующего поле плоской волны.

Одним из важных элементов компактного полигона является коллиматор, в нашем случае представляющий собой несимметричный вырез металлического зеркала параболической формы, который преобразует волну точечного источника, расположенного в фокусе, в плоскую волну. При этом необходимо учитывать влияние границ зеркала коллиматора на неравномерность распределения отраженного поля [1].

Существует несколько способов снижения влияния краевых эффектов. Обычно края коллиматоров делают зазубренными или отгибают, чтобы либо уменьшить интенсивность дифрагированных лучей, приходящих в рабочую зону коллиматора, либо перенаправить их мимо рабочей зоны. Эти способы позволяют существенно уменьшить неоднородность поля в рабочей зоне, но, естественно, не могут сделать отраженную волну идеально плоской.

Преимуществом коллиматоров с зазубренными краями является их конструктивная простота: зазубрины на границах таких коллиматоров продолжают параболическую поверхность зеркала, такое зеркало проще изготовить и отъюстировать. Зеркало с отогнутыми краями – более сложный объект с областями различной кривизны. В то же время, коллиматоры с отогнутыми краями позволяют получить лучшие характеристики поля при том же размере безэховой камеры [2, 3].

Существенным побочным эффектом использования коллиматоров со скругленными краями является появление интенсивных боковых лучей, распространяющихся в направлении, отличном от оси параболоида. Конечно, чаще всего такие лучи попадают не в рабочую зону коллиматора, а на стены безэховой камеры, но, несмотря на то, что стены безэховой камеры

покрыты радиопоглощающим материалом, при некоторых условиях (например, при падении волны под скользящими углами) боковые лучи могут и переотразиться в рабочую зону и существенно повлиять на структуру поля [4].

На основании построенной модели была написана программа, позволяющая рассчитывать как поле в рабочей зоне коллиматора со скругленными краями, так и распределение поля вне рабочей зоны [5].

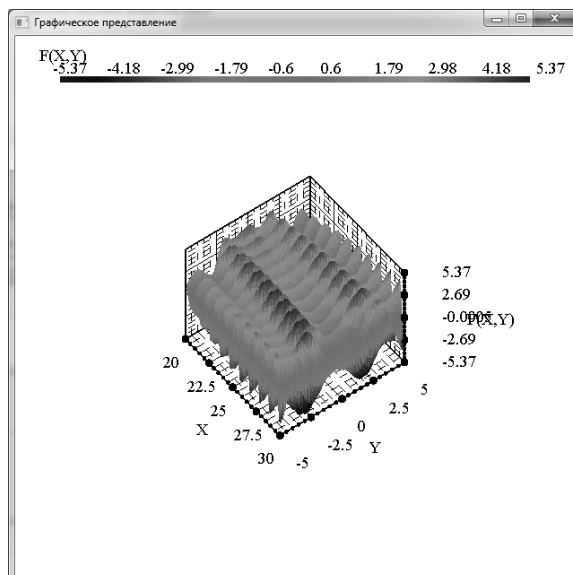


Рис.1 Распределение поля коллиматора со скругленными импедансными краями в рабочей зоне

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Балабуха Н.П., Зубов А.С., Солосин В.С. 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] Lee T., Burnside W. Performance trade-off between serrated edge and blended edge compact range reflectors. IEEE Transactions on antennas and propagation, vol. 44, no. 1, January 1996.
- [4] Никитенко А.В., Зубов А.С., Шапкина Н.Е. Моделирование электромагнитного рассеяния на радиопоглощающем материале методом связанных волн. //Математическое моделирование // Математическое моделирование. Т. 26, № 9, 2014, С. 18–32.
- [5] Хлебников Ф.Б., Шапкина Н.Е., Солосин В.С. Математическое моделирование поля в ближней зоне зеркального коллиматора, Двенадцатая ежегодная научная конференция ИТПЭ РАН, Москва 4-7 апреля 2011.

РАСЧЕТ ДИФРАКЦИИ ПОЛЯ КОЛЛИМАТОРА НА СТЕНКАХ БЭК И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РПМ НА НЕОДНОРОДНОСТЬ ПОЛЯ В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ

А.В. Никитенко, А.С. Зубов, Е.В. Булычев

ИТПЭ РАН

Радиопоглощающий материал, размещаемый на стенках компактных полигонов, как правило, имеет периодическую структуру, состоящую из множества одинаковых “ячеек”, чаще всего клиновидной или пирамидальной формы. Такая структура является дифракционной решеткой, на которую падает поле коллиматора.

В работе [1] показано, что дифракционные лепестки (побочные гармоники) вносят существенный вклад в отраженное поле, а в ряде случаев амплитуда этих гармоник существенно превосходит амплитуду зеркального отражения.

В данной работе предложена математическая модель компактного полигона, учитывающая отражение поля коллиматора от РПМ с периодической структурой. Также предложен метод решения задачи дифракции поля коллиматора на стенках типичного компактного полигона. В работе рассматривается диапазон частот 1-10 ГГц, для такого диапазона характерные размеры РПМ, имеющего наилучшие характеристики, составляют порядка 30 см в высоту и 10 см период.

В предложенной модели компактного полигона используются следующие приближения:

1) Для расчета поля коллиматора в свободном пространстве используется метод физической оптики, непосредственно расчет проведен с помощью пакета программ *FEKO*.

2) Особенности отражения от стыков стенок камеры, а также от углов не учитываются, отражение от каждой стенки рассчитывается отдельно, независимо друг от друга.

3) Поля, испытавшие двойное отражение от радиопоглощающего материала считаются ничтожно малыми и не учитываются в расчете поля в рабочей зоне.

4) Поле коллиматора локализовано в некоторой ограниченной области, вне которой оно равно нулю (поскольку стенки камеры металлические). Отраженное поле в свою очередь рассчитывается в той же ограниченной области, что и поле коллиматора. Поэтому задачу дифракции на конечной стенке можно заменить задачей отражения от бесконечной стенки, покрытой радиопоглощающим материалом.

Алгоритм решения задачи следующий. Поле коллиматора раскладывается в ряд по плоским волнам E - и H -поляризации. Расчет отражения полученных плоских волн осуществляется методом связанных волн, описанным в работе [1]. Для получения отраженного поля суммируются все отраженные гармоники для каждой падающей плоской волны.

На основе программы, реализующей алгоритм расчета, было проведено исследование влияния различных эффектов, связанных с отражением от РПМ, на неравномерность поля в рабочей зоне компактного полигона. В качестве иллюстрации, на рис. 1 представлен расчет поля коллиматора, отраженного от боковых стенок камеры в одном из сечений рабочей зоны.

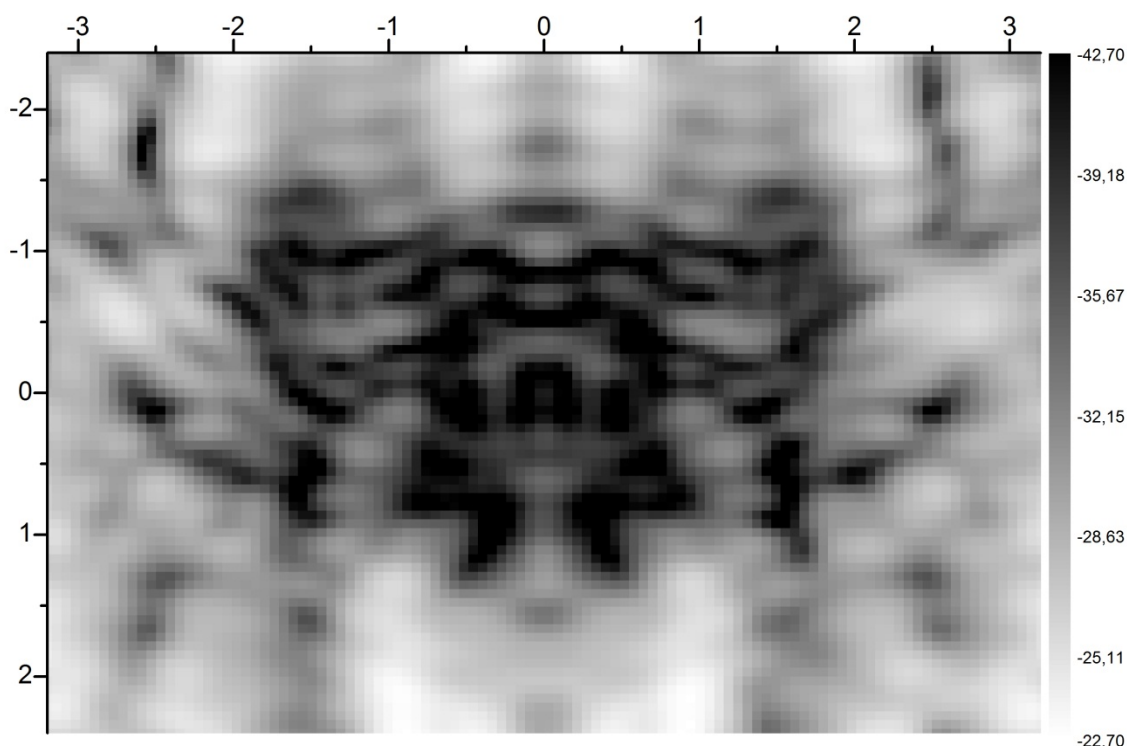


Рис. 1. Интерференция полей, отраженных от боковых стен, потолка и пола.
Частота 1.5 ГГц, центральное сечение рабочей зоны.

ЛИТЕРАТУРА

- 1) *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.

КРОССПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РУПОРНОЙ БЕЗЭХОВОЙ КАМЕРЫ

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

ИТПЭ РАН

В данной работе проведено исследование кроссполяризационных характеристик рупорной безэховой камеры (РБЭК) с габаритами прямоугольной секции 8м x 8м x 10м и длиной рупора 15м [1] на частотах $0.1 \div 1$ ГГц. Рассмотрен вариант снижения кроссполяризационной составляющей поля с помощью решетки из тонких параллельных проводников.

Уровень кроссполяризационной составляющей компоненты электрического поля в рабочей зоне РБЭК был рассчитан для модели РБЭК в натуральную величину для практически используемого диапазона частот и был измерен на масштабной модели (1:20) РБЭК на пропорционально увеличенной сетке частот. Расчет распределения поля в рабочей зоне РБЭК был выполнен на вычислительном комплексе ИТПЭ РАН с использованием программы FEKO [1]. Несмотря на то, что модель и источник в расчетах обладали симметрией в поперечном сечении, уровень кроссполяризационной компоненты электрического поля на краях рабочей зоны при использовании в качестве источника антенны ETS Lingren 3164-01 достигал -20дБ. Использование линзы с целью выравнивания фронта волны на высоких частотах [2, 3] увеличивает уровень кроссполяризационной компоненты до -19дБ. В экспериментах с масштабным макетом уровень кроссполяризационной компоненты электрического поля на краях рабочей зоны составил -25дБ (источник открытый конец волновода).

Естественный способ снизить уровень кроссполяризационной компоненты - установить после линзы поляризатор в виде решетки из параллельных проводников. Поле после решетки было рассчитано с использованием программы FEKO.

На первый взгляд, кажется, что достаточно прикрыть решеткой поперечник равный поперечнику рабочей зоны РБЭК. Однако, как показывает расчет, уровень кроссполяризационной компоненты поля снижается незначительно, особенно в наиболее важной центральной части рабочей зоны. На рис. 1 представлена зависимость уровня кроссполяризационной компоненты поля вдоль продольной оси Z в центре рабочей зоны при использовании квадратной решетки из параллельных проводников со стороной квадрата 3м равной диаметру рабочей зоны. На рис. 2 представлена зависимость уровня кроссполяризационной компоненты поля вдоль продольной оси в центре рабочей зоны при использовании квадратной решетки со стороной квадрата 6м.

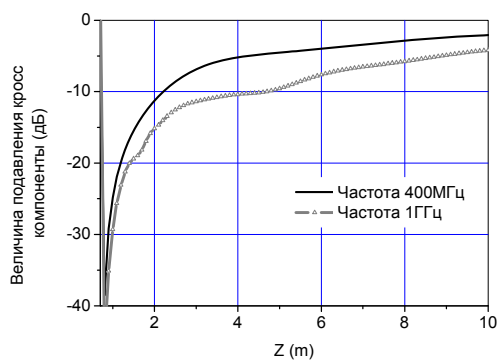


Рис. 1 Величина подавления кроссполяризованной компоненты поля поляризатором в виде решетки 3м x 3м.

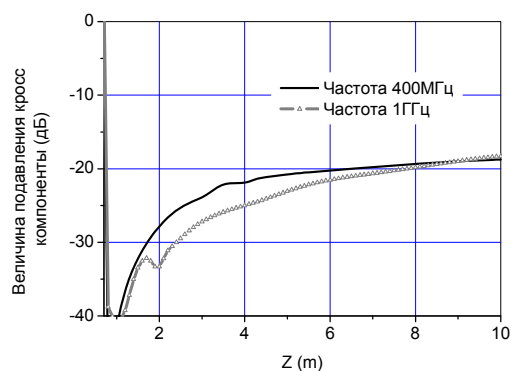


Рис. 2 Величина подавления кроссполяризованной компоненты поля поляризатором в виде решетки 6м x 6м.

Из графиков видно, что для того чтобы снизить уровень кроссполяризованной компоненты поля до величин требуемых на практике (порядка -35 дБ) необходимо использовать решетку достаточно большого размера, близкого к поперечному размеру РБЭК.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Н.П. Балабуха, Н.Л. Меньших, В.С. Солосин, XVI ЕЖЕГОДНАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ИТПЭ РАН, 2015.
- [2] E.F. Knott. Radar cross section. SciTech Publishing, Inc. 2004.
- [3] S. Matitsine, P. Lagoiski, L. Matytsine, M. Matytsine, T.-T. Chia, P.-K. Tan, V. Rodriguez. Extension of Tapered Chamber Quiet Zone with Large RF Lens. AMTA, 2012, A12, 008.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В РУПОРНОЙ БЕЗЭХОВОЙ КАМЕРЕ С ЛИНЗОЙ ПОКРЫТОЙ С ДВУХ СТОРОН ПРОСВЕТЛЯЮЩИМ СЛОЕМ

Н.П. Балабуха¹, Н.Л. Меньших^{1,2}, В.С. Солосин¹

¹ИТПЭ РАН

²МФТИ (ГУ)

Безэховые камеры (БЭК) рупорного типа активно используются при измерениях на низких частотах [1].

Ранее [2] нами исследовалось поле в рабочей зоне рупорной камеры с линзой. Линза устанавливается в апертуре рупорной части камеры (поперечное сечение 8.3м × 8.3м) и используется в диапазоне частот 0.1 – 1 ГГц. По результатам расчета было показано, что в рабочей зоне камеры, представляющей собой горизонтально расположенный цилиндр диаметром 3 м и длиной 3 м, неравномерность поля в верхней части диапазона частот (~1 ГГц) составила 3 дБ. В нижней части диапазона (~400 МГц) неравномерность составляет 4 дБ.

В данной работе исследуется возможность уменьшения неравномерности поля после линзы путем ее просветления. Расчет распределения поля в рабочей зоне рупорной БЭК был выполнен на вычислительном комплексе ИТПЭ РАН с использованием программы FEKO.

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

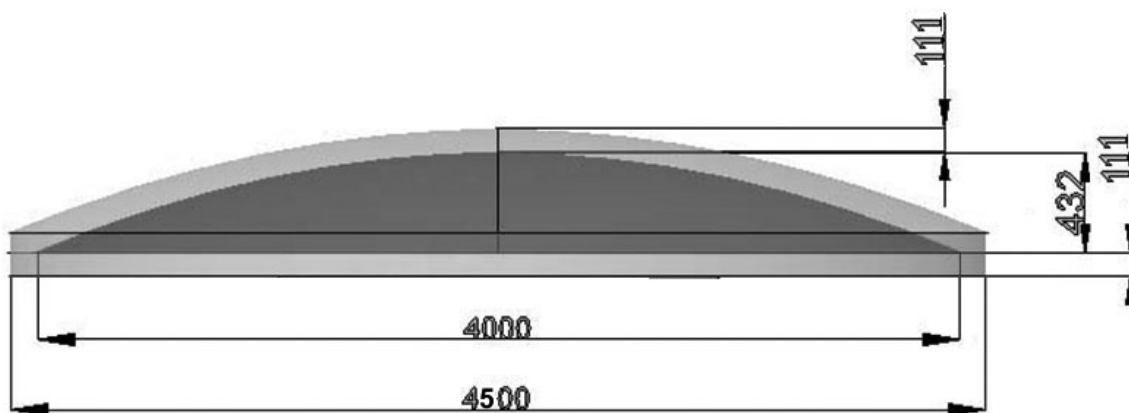


Рис.1. Линза с просветлением

Результаты расчета распределения амплитуды поля на частотах

400 МГц и 800 МГц представлены на рис. 2 и 3 для вертикальной плоскости при горизонтальной поляризации падающей волны. Приведено наихудшее распределение поля в рабочей зоне для линзы с просветлением и без просветления. Неравномерность амплитуда поля в рабочей зоне после линзы до просветления составляла 4 дБ, после просветления – 3 дБ.

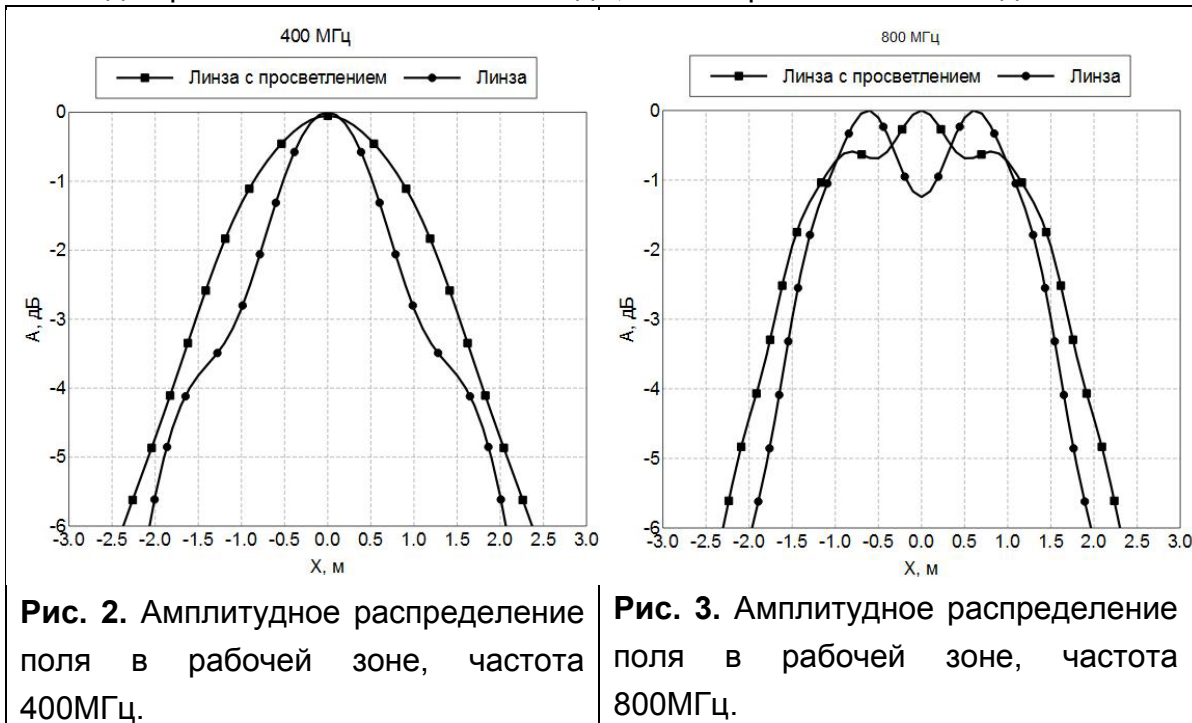


Рис. 2. Амплитудное распределение поля в рабочей зоне, частота 400МГц.

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

Неравномерность распределения фазы поля для линзы с просветлением и без него изменилась незначительно и составила 10° в пределах рабочей зоны.

По результатам расчета можно заключить, что просветление поверхностей линзы позволяет уменьшить неравномерность распределения амплитуды поля в рабочей зоне рупорной БЭК с 4 дБ до 3 дБ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Балабуха Н.П., Зубов А.С., Солосин В.С. Компактные полигоны для измерения характеристик рассеяния. М.:Наука, 2007.
- [2] Балабуха Н.П., Меньших Н.Л., Солосин В.С. Математическое моделирование электромагнитного поля в рупорной безэховой камере с линзой. Шестнадцатая ежегодная конференция ИТПЭ РАН (М.: 18-21 мая 2015).

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ КОЛЛИМАТОРА В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

Н.П. Балабуха, Е.В. Булычев

ИТПЭ РАН

В работе представлены результаты расчетов распределения электромагнитного поля в рабочей зоне коллиматора МАК-5М с звездообразной кромкой в полосе частот 0.4 - 5.0 ГГц.

Задача коллиматора заключается в формировании электромагнитного поля плоской волны [1]. Однако получить идеальную плоскую волну в реальных условиях невозможно в силу ограниченности размеров зеркала коллиматора, погрешностей изготовления и сборки конструкции зеркала, физики излучения облучателей, переотражений от стен, пола и потолка безэховой камеры, присутствие в безэховой камере различных устройств и приспособлений, таких как система облучателей, поворотные устройства, подъемные механизмы [1]. Поэтому полем плоской волны формируемым коллиматором называется поле амплитуда и фаза которого отличается от идеального в пределах допустимых погрешностей. Объем пространства, в котором формируется данное поле, является так называемой тихой зоной или рабочей зоной коллиматора [1]. На низких частотах основной причиной уменьшения рабочей зоны является дифракция электромагнитной волны на кромках рефлектора коллиматора, а на высоких – точность изготовления отражающей поверхности рефлектора. Увеличение рабочей зоны коллиматора в широкой полосе частот является сложной научно-технической задачей, включающей в себя проектирование и настройку облучателей, оптимизацию формы краев зеркала, оптимального расположения радиопоглощающего материала и многого другого. Проведение данных работ в натуральных условиях требуют значительных временных и финансовых ресурсов. Моделирование распределения электромагнитного поля посредством использования современных программных комплексов и электронно-вычислительных машин позволяет достаточно быстро проводить оценку влияния тех или иных мероприятий направленных на увеличение рабочей зоны коллиматора.

На данном этапе расчетов модель коллиматора состояла из двух основных элементов: зеркала коллиматора и облучающей антенны. Расчет проводился в программе FEKO на вычислительном комплексе ИТПЭ РАН. Рефлектор коллиматора представляет собой несимметричную вырезку из параболоида вращения с звездообразной кромкой и фокусным расстоянием 3,5 метра. Размеры апертуры рефлектора - 4,5 x 6,0 метров. Отражающая поверхность рефлектора является идеальной, то есть отсутствуют

отклонения от поверхности параболоида вращения. В фокусе рефлектора расположен конический облучатель. Расчет проводился на следующих частотах: 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,3; 2,6; 5,0 ГГц. Целью работы является оценка размеров рабочей зоны коллиматора в области низких частот. Получены результаты распределения электромагнитного поля по амплитуде и фазе в трех плоскостях в рабочей зоне коллиматора. На рис. 1 представлены результат расчета распределения амплитуды поля в центральной плоскости рабочей зоны коллиматора на частотах 0,6 и 5,0 ГГц.

Из полученных результатов можно увидеть как ведет себя электромагнитное поле в рабочей зоне коллиматора на частотах ниже 1,0 ГГц, где наблюдается увеличение неравномерности амплитуды и, как следствие, снижение размеров рабочей зоны. Так на частоте 0,4 ГГц размер рабочей зоны уменьшается до 1 метра, в то время как на частоте 5,0 ГГц размер рабочей зоны составляет 2,5 метра.

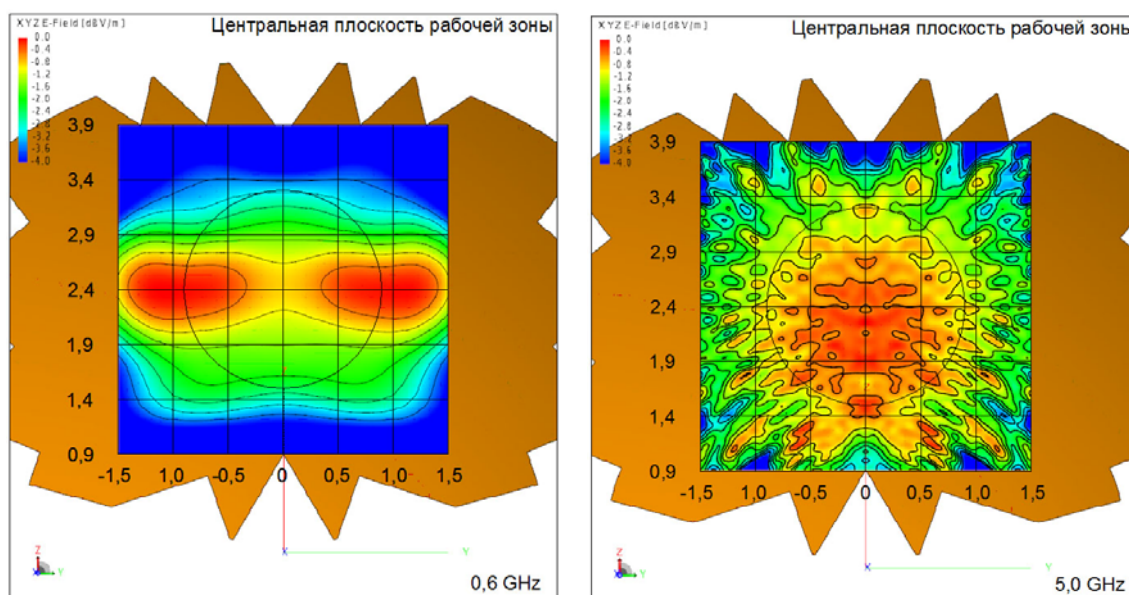


Рис.1. Распределение амплитуды поля в центральной плоскости рабочей зоны коллиматора.

ЛИТЕРАТУРА

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

**ПОДАВЛЕНИЕ ДИФРАКЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ
ДИАГРАММЫ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ ЭЛЕМЕНТА КОНСТРУКЦИИ
В СОСТАВЕ 6-УГОЛЬНОЙ ПЛАСТИНЫ И ВЕКТОРЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО
ПОЛЯ, ПАРАЛЛЕЛЬНОМ ПЛАСТИНЕ**

А.М. Лебедев, Т.А. Фурманова

ИТПЭ РАН

В рамках развития численной версии физической теории дифракции (ФТД) были продолжены работы по выработке приёмов подавления дифракционных эффектов (ДЭ) на концах макета в виде 6-угольной металлической пластины, на которую помещается объект для измерения его диаграммы обратного рассеяния (ДОР). Напомним, что классическая ФТД представляет гибрид физической оптики и аналитического решения задачи рассеяния плоской волны на клине с полубесконечными гранями. Здесь предлагается гибрид физической оптики и численного решения в строгой постановке для задач рассеяния на некоторых сложных по составу элементах конструкции. Размещение элементов на макете, как правило, необходимо, поскольку позволяет сохранить "специфику" взаимодействия элемента с окружающей поверхностью, в том числе переотражения падающего и рассеянного полей от окружающей поверхности. Носики 6-угольной пластины обеспечивают имитацию полубесконечности границ макета. Проблема, однако, заключается в дифракционных эффектах на носиках пластины, которые делают невозможным корректное определение ДОР элемента конструкции в направлениях, близких к скользящим вдоль поверхности пластины.

Ранее была решена задача подавления ДЭ на носиках 6-угольной пластины для случая вычисления ДОР, когда падающая волна имеет составляющую вдоль пластины. В данной работе обсуждается решение той же задачи для случая, когда вектор электрического поля падающей волны ориентирован поперёк пластины и параллелен её поверхности.

Маскировка краёв пластины цилиндрами РПП, реально изготавливаемого в ИТПЭ РАН, позволила на 2 порядка уменьшить обусловленные ДЭ искажения ДОР 6-угольной пластины при приближении направления облучения-наблюдения к скользящему. Одновременно соответствующим образом расширилась угловая область хорошей точности физико-оптического расчёта ДОР пластины. Использование покрытия с воображаемыми электродинамическими параметрами позволило уменьшить обусловленные ДЭ искажения ДОР ещё на 2 порядка.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

СОДЕРЖАНИЕ

1. **ВЛИЯНИЕ ТОПОЛОГИИ МАГНИТНОЙ ПОДСИСТЕМЫ НА ТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА ГЕТЕРОСТРУКТУР С ДЕЛЬТА-СЛОЕМ** Мп Б.А. Аронзон, Л.Н. Овешников, К.И. Кугель, V. Tripathi, ИТПЭ РАН, Физический Институт им. П.Н. Лебедева РАН, Tata Institute for Fundamental Research, Mumbai, India 3
2. **ЭФФЕКТ УСИЛЕНИЯ СИГНАЛА ГИГАНТСКОГО КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЙЯНИЯ НА УПОРЯДОЧЕННОМ МАССИВЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИГЛ С НАНОМЕТРОВЫМИ РАЗМЕРАМИ** К.Н. Афанасьев, И.А. Богинская, И.А. Будашов, А.В. Зверев, И.Н. Курочкин, И.А. Рыжиков, А.К. Сарычев, А.В. Иванов, М.В. Седова, И.А. Родионов, А.Н. Лагарьков, ИТПЭ РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова, Химический факультет, НОЦ «Функциональные микро/наносистемы» 4
3. **УСИЛЕНИЕ СИГНАЛА ГИГАНТСКОГО КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЙЯНИЯ НА ПОДЛОЖКАХ НА ОСНОВЕ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ** К.Н. Афанасьев, И. А. Богинская, И.В. Быков, И.А. Будашов, И.Н. Курочкин, А. В. Дорофеев, И.А. Рыжиков, Р.А. Сиразов, ИТПЭ РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова, Химический факультет, МФТИ (ГУ) 6
4. **КОМПОЗИТНЫЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МЕТАМАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ПЕРИОДИЧЕСКИХ НАНОСТРУКТУР** А.Н. Лагарьков, И.А. Богинская, И.А. Будашов, А.А. Ежов, А.А. Федянин, А.В. Иванов, И.Н. Курочкин, С.С. Косолюбов, А.В. Латышев, Д.А. Насимов, И.А. Рыжиков, М.Р. Щербаков, А.В. Васькин, А.К. Сарычев, ИТПЭ РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет, ИБХФ им. Н.М. Эммануэля, ИФП СО РАН 8
5. **ПРОВОДИМОСТЬ И АНОМАЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ ХОЛЛА МАГНИТНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ НЕСТЕХИОМЕТРИЧЕСКИХ ОКСИДОВ** В.В. Рыльков, С.Н. Николаев, К.Ю. Черноглазов, А.В. Ситников, Ю.Е. Калинин, А.Б. Грановский, ИТПЭ РАН, НИЦ «Курчатовский Институт», Воронежский Государственный Технический Университет, МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет 10
6. **ТОРОИДНЫЙ ОТКЛИК В МЕТАМАТЕРИАЛАХ** А.А. Башарин, Н.А. Вольский, М.В. Кожокар, И.В. Стенищев, А.В. Устинов, К.И. Щеголева, В.И. Чугуевский, Лаборатория «Сверхпроводящие метаматериалы» Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Physikalisches Institut, Karlsruhe Institute of Technology, Germany, Воронежский государственный технический университет 12

7.	КАНОНИЧЕСКОЕ КВАНТОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПЛАЗМОН ПОЛЯРИТОНОВ <u>В.Ю. Шишков</u> , Е.С. Андрианов, А.А. Пухов, А.П. Виноградов, А.А. Лисянский, МФТИ (ГУ), ИТПЭ РАН, Department of Physics, Queens College of the City University, New York, The Graduate Center of the City University, New York	15
8.	ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НЕБЛИЖАЙШИХ СОСЕДЕЙ В ЦЕПОЧКАХ КОЛЬЦЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ <u>А.М. Пикалов</u> , А.В. Дорофеев, А.П. Виноградов, А.Б. Грановский, МГУ им. Ломоносова, ИТПЭ РАН, МФТИ (ГУ)	16
9.	ПЛАЗМОННО-ФОТОННАЯ ПЛАСТИНА КАК ЭЛЕМЕНТ ОПТИЧЕСКОГО СЕНСОРА <u>А.М. Мерзлякин</u> , А.В. Барышев, ИТПЭ РАН, ФТИ им. А.Ф. Иоффе	18
10.	СВЕРХИЗЛУЧЕНИЕ НЕДИКОВСКИХ СОСТОЯНИЙ Н.Е. Нефедкин, ИТПЭ РАН, МФТИ (ГУ)	20
11.	ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ АНИЗОТРОПНОГО ВЕЙЛЕВСКОГО ПОЛУМЕТАЛЛА С ПРИМЕСЯМИ Я.И. Родионов, <u>К.И. Кугель</u> , F.Nori, ИТПЭ РАН, Center for Emergent Matter Science, RIKEN, Saitama, Japan ...	21
12.	ЭЛЕКТРОННЫЕ СВОЙСТВА ПОДКРУЧЕННОГО ГРАФЕНА <u>А.О. Сбойчаков</u> , А.Л. Рахманов, А.В. Рожков, Ф. Нории, ИТПЭ РАН, QCMRG, RIKEN, Japan	22
13.	ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ЭЛЕКТРОННЫЕ СВОЙСТВА СИСТЕМЫ С НЕИДЕАЛЬНЫМ НЕСТИНГОМ ПОВЕРХНОСТИ ФЕРМИ <u>А.Л. Рахманов</u> , К.И. Кугель, А.В. Рожков, А.О. Сбойчаков, ИТПЭ РАН .	24
14.	ДВУМЕРНОЕ УРАВНЕНИЕ ДИРАКА: ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ И КРАЕВЫЕ СОСТОЯНИЯ А.В. Рожков, ИТПЭ РАН	25
15.	ДИНАМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ЛЭМБА В СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ СИСТЕМАХ С ДИССИПАЦИЕЙ А.А. Жуков, Д.С. Шапиро, <u>В.В. Погосов</u> , Ю.Е. Лозовик, Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им.Н.Л. Духова, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, ИТПЭ РАН, Институт спектроскопии РАН	26
16.	ДЛИТЕЛЬНЫЕ ВРЕМЕНА РЕЛАКСАЦИИ ФОТОВОЗБУЖДЕННЫХ НОСИТЕЛЕЙ ТОКА И ФОТОПРОВОДИМОСТЬ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ С ОРГАНИЧЕСКИМИ ДИПОЛЬНЫМИ МОЛЕКУЛАМИ Y. Chen, <u>Я.И. Родионов</u> , К.С. Тихонов, А.А. Захидов, В.В. Подзорнов, Rutgers University, Piscataway, USA, ИТПЭ РАН, Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН, University of Texas at Dallas, Richardson, USA	28

17.	ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ МАТЕРИАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ Fe-Al-Si <u>А.О. Ширяев</u> , К.Н.Розанов, С.Н. Старостенко, В.А. Гаранов, Д.А. Петров, А.Д. Мишин, Э.С. Жакина, ИТПЭ РАН	29
18.	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ МАТЕРИАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОРОШКОВ SiC В СВЧ ДИАПАЗОНЕ <u>А.Д. Мишин</u> , С.Н. Старостенко, К.Н. Розанов, ИТПЭ РАН	30
19.	ИЗМЕРЕНИЕ МАТЕРИАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ В ПРЯМОУГОЛЬНОМ ВОЛНОВОДЕ <u>С.Ю. Бобровский</u> , А.В. Осипов, Д.А. Петров, К.Н. Розанов, ИТПЭ РАН	32
20.	ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОСТАВОВ В КОМПОЗИТНОЙ СИСТЕМЕ Fe@SiO ₂ -ПАРАФИН <u>Ю.А. Адамович</u> , С.С. Маклаков, С.А. Маклаков, И.А. Рыжиков, Д.С.Филимонов, Д.А. Петров, К.Н. Розанов, В.А. Гаранов, А.Ю. Зарубина, ИТПЭ РАН, МФТИ (ГУ), МГУ имени М.В. Ломоносова, Химический факультет	34
21.	СТРУКТУРИРОВАННЫЕ ПЛЕНКИ СЕРЕБРА, ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО ИСПАРЕНИЯ <u>А.С. Бабурин</u> , А.Р. Габидуллин, И.А. Богинская, А.В. Зверев, Ю.В. Панфилов, С.С. Маклаков, И.А. Родионов, И.А. Рыжиков, НОЦ «Функциональные микро/наносистемы», ИТПЭ РАН	36
22.	ПОЛУЧЕНИЕ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЁНОК VO ₂ ПРИ ПОМОЩИ РЕАКТИВНОГО МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ И ОТЖИГА <u>В.И. Полозов</u> , С.С. Маклаков, С.А. Маклаков, И.А. Рыжиков, В.А. Амеличев, В.Н. Кисель, ИТПЭ РАН, МФТИ (ГУ), ЗАО «СуперОкс» .	38
23.	ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ ПОЛИПАРАКСИЛИЛЕН-СЕРЕБРО И.А. Богинская, А.В. Гусев, К.А. Маилян, И.А. Родионов, М.В. Седова, И.А. Рыжиков, <u>И.В. Трофимов</u> , ИТПЭ РАН	40
24.	РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ НАНЕСЕНИЯ ТОКОПРОВОДЯЩЕГО СЛОЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО НАГРЕВАТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ПЛЕНОЧНОГО ТИПА ДЛЯ ВТОРИЧНОГО ЗЕРКАЛА ТЕЛЕСКОПА КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ Т-170М А.В. Гусев, <u>С.В. Карпов</u> , К.А. Маилян, И.А. Рыжиков, М.В. Седова, ИТПЭ РАН, МФТИ (ГУ)	42
25.	ВЛИЯНИЕ ВЫСШИХ МОД В КОАКСИАЛЬНОМ ВОЛНОВОДЕ НА ИЗМЕРЕНИЯ МАТЕРИАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ <u>Д.А. Петров</u> , К.Н. Розанов, ИТПЭ РАН	43
26.	РАСЧЕТ РАССЕЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН ПОЛОСТЬЮ С РАСТРУБОМ В.Н. Кисель, ИТПЭ РАН	44

27.	ЧАСТОТНО-СЕЛЕКТИВНЫЕ СТРУКТУРЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ДИАГРАММЫ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ ЛИНЕЙНОЙ ФАР Л ДИАПАЗОНА <u>А.И. Синани</u> , <u>Г.Ф. Мосейчук</u> , <u>А.Ю. Гринев</u> , <u>А.П. Волков</u> , НИИП им. В.В. Тихомирова, МАИ (НИУ), АО «Концерн «Вега»	46
28.	МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕРКАЛЬНОГО КОЛЛИМАТОРА С ИМПЕДАНСНЫМИ СКРУГЛЕННЫМИ КРАЯМИ <u>Ф.Б. Хлебников</u> , <u>А.Н. Боголюбов</u> , <u>Н.Е. Шапкина</u> , <u>Д.А. Коняев</u> , МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет, ИТПЭ РАН	48
29.	РАСЧЕТ ДИФРАКЦИИ ПОЛЯ КОЛЛИМАТОРА НА СТЕНКАХ БЭК И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РПМ НА НЕОДНОРОДНОСТЬ ПОЛЯ В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ <u>А.В. Никитенко</u> , <u>А.С. Зубов</u> , <u>Е.В. Булычев</u> , ИТПЭ РАН	50
30.	КРОССПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РУПОРНОЙ БЕЗЭХОВОЙ КАМЕРЫ <u>Н.П. Балабуха</u> , <u>Н.Л. Меньших</u> , <u>В.С. Солосин</u> , ИТПЭ РАН	52
31.	МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В РУПОРНОЙ БЕЗЭХОВОЙ КАМЕРЕ С ЛИНЗОЙ ПОКРЫТОЙ С ДВУХ СТОРОН ПРОСВЕТЛЯЮЩИМ СЛОЕМ <u>Н.П. Балабуха</u> ¹ , <u>Н.Л. Меньших</u> ^{1,2} , <u>В.С. Солосин</u> , ИТПЭ РАН, МФТИ (ГУ)	54
32.	МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ КОЛЛИМАТОРА В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ <u>Н.П. Балабуха</u> , <u>Е.В. Булычев</u> , ИТПЭ РАН	56
33.	ПОДАВЛЕНИЕ ДИФРАКЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ ДИАГРАММЫ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ ЭЛЕМЕНТА КОНСТРУКЦИИ В СОСТАВЕ 6-УГОЛЬНОЙ ПЛАСТИНЫ И ВЕКТОРЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ, ПАРАЛЛЕЛЬНОМ ПЛАСТИНЕ <u>А.М. Лебедев</u> , <u>Т.А. Фурманова</u> , ИТПЭ РАН	58

**СЕМНАДЦАТАЯ ЕЖЕГОДНАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ИТПЭ РАН**

Сборник тезисов докладов

Подписано в печать 04.16		Формат 60x84/16
Печать офсетная	Уч.-изд.л. 2,25	Усл.-печ.л 2,09
Тираж 100 экз.	Заказ № 92	

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