= ФИЗИКА ·

УДК 537.86:620.22-022.532

DOI: https://doi.org/10.54341/20778708\_2022\_1\_50\_7

# МОДЕЛИРОВАНИЕ, СОЗДАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТАПОВЕРХНОСТЕЙ, ПОКРЫВАЮЩИХ ОБЪЕКТЫ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

А.П. Балмаков<sup>1</sup>, С.А. Хахомов<sup>1</sup>, И.В. Семченко<sup>1</sup>, Д. Ли<sup>2</sup>, Д. Ванг<sup>2</sup>, В. Сонг<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины <sup>2</sup>Университет Цзяннань, Уси <sup>3</sup>Пекинский технический институт

## MODELING, CREATING AND EXPERIMENTAL STUDY OF METASURFACES COVERING OBJECTS OF COMPLEX SHAPE

A.P. Balmakou<sup>1</sup>, S.A. Khakhomov<sup>1</sup>, I.V. Semchenko<sup>1</sup>, J. Li<sup>2</sup>, J. Wang<sup>2</sup>, W. Song<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Francisk Skorina Gomel State University <sup>2</sup>Jiangnan University, Wuxi <sup>3</sup>Beijing Institute of Technology

Аннотация. В статье разработаны, с использованием программ автоматизированного проектирования, аддитивных средств производства, таких как оборудование с числовым программным управлением, изготовлены и экспериментально исследованы образцы метаповерхностей для экранизации металлических или металлизированных объектов сложной формы и уменьшения отражения излучения от них.

Ключевые слова: элементарная ячейка, элемент метаповерхности, кольцевой резонатор, электрическая проводимость, преобразование поляризации излучения, безэховая камера, коэффициент поглощения излучения.

Для цитирования: Балмаков, А.П. Моделирование, создание и экспериментальное исследование метаповерхностей, покрывающих объекты сложной формы / А.П. Балмаков, С.А. Хахомов, И.В. Семченко, Д. Ли, Д. Ванг, В. Сонг // Проблемы физики, математики и техники. – 2022. – № 1 (50). – С. 7–13. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708 2022 1 50 7

**Abstract.** In this article, using computer-aided design programs, additive manufacturing means, such as numerically controlled equipment, the samples of metasurfaces for screening metal or metallized objects of a complex shape and reducing the reflection of radiation from them have been produced and experimentally studied.

**Keywords:** unit cell, metasurface element, ring resonator, electrical conductivity, transformation of radiation polarization, anechoic chamber, radiation absorption coefficient.

For citation: Balmakou, A.P. Modeling, creating and experimental study of metasurfaces covering objects of complex shape / A.P. Balmakou, S.A. Khakhomov, I.V. Semchenko, J. Li, J. Wang, W. Song // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2022. – № 1 (50). – P. 7–13. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708\_2022\_1\_50\_7 (in Russian)

#### Введение

Объектом исследования в данной работе являются металл-диэлектрические метаповерхности, представляющие собой двумерные периодические массивы из металлических элементов определенной формы, обладающие определенной электрической проводимостью, расположенные в диэлектрическом слое с определенными материальными параметрами, период расположения которых в массиве значительно меньше длины волны резонансного излучения возбуждения структуры метаповерхности.

Целью данной работы является разработка моделей численного исследования электромагнитных свойств ультратонких метаповерхностей, взаимодействующих с электромагнитным излучением с целью управления электродинамическими параметрами излучения; создание управляющих программ для оборудования с числовым программным управлением с целью изготовления экспериментальных образцов исследуемых метаповерхностей; проектирование различных типов метаповерхностей для достижения расчетных электродинамических параметров, направленных на контролируемое отражение, поглощение, пропускание, преобразование электромагнитного излучения, взаимодействующего со структурой метаповерхности; определение ключевых параметров метаповерхности, ответственных за частотно- и поляризационно-селективные отражательные и поглощающие свойства; рассмотрение возможности применения новых типов электродинамических материалов, основанных на концепции исследуемых метаповерхностей, например, идеальных поглотителей электромагнитного преобразователей излучения, поляризации,

<sup>©</sup> Балмаков А.П., Хахомов С.А., Семченко И.В., Ли Д., Ванг Д., Сонг В., 2022

частотно- и поляризационно-селективных фильтров излучения и др.

Для достижения поставленных целей в работе использованы методы разработки аналитических моделей и проведения аналитических расчётов, численной обработки аналитических данных, компьютерного моделирования физических процессов в слоистых структурах, вариационный и топологический анализ моделей, компьютерное автоматизированное 3D проектирование, экспериментальное исследование комплексных коэффициентов передачи и отражения (S<sub>21</sub>, S<sub>11</sub> параметров), а также коэффициента поглощения излучения.

### 1 Разработка управляющих программ для создания трехмерной модели проектируемой ультратонкой билатеральной метаповерхности

Ранее были представлены и исследованы несколько типов трехмерных моделей численного исследования метаматериала-поглотителя излучения гиперболического типа в пространственной периодической решетке которого каждый из рядов состоял из чередующихся периодически слоев графена и диоксида кремния, а также модернизированная структура, в которую добавлен дополнительный слой металлических колец переменного диаметра, расположенный на поверхности слоя графена [1]. Конструктивные особенности исследуемых моделей, используемые материалы с оптимальными оптическими характеристиками, а также локализация графеновых слоев, которые характеризуются низкими диссипативными потерями энергии и высокой плотностью носителей заряда [2]-[5], стимулируя возбуждение поверхностных плазмонов, были оптимизированы для функционирования в инфракрасном спектральном диапазоне. Однако проверка ключевых функциональных особенностей исследуемых метаповерхностей может быть проведена в спектральном диапазоне отличном от изначально заданного при перемасштабировании модели, основываясь на принципе электродинамической масштабной инвариантности, что позволяет изготовить масштабную копию исследуемой метаповерхности и провести исследование ее электродинамических свойств, например, в микроволновом диапазоне, принимая во внимание важность корректировки материальных параметров и учитывая их дисперсионные характеристики. В случае с рассматриваемыми моделями, их масштабирование в новый диапазон возбуждения сопряжено с отказом от графенового слоя в структуре метаповерхности, функциональность которого в новых условиях существенно снижается, поэтому масштабируемая модель является довольно грубым приближением, которая тем не менее способна предсказать поведение и важные данные о функциональных особенностях исследуемых метаповерхностей в первом приближении.

Для разработки управляющих программ создания образцов трехмерной модели метаповерхности с резонансной частотой возбуждения порядка ЗГГц в среде моделирования Ansys Space-Claim & DSM была произведена трансформация уже разработанной ранее модели, элементарная ячейка которой показана на рисунке 1.1, в масштабную модель без графенового слоя и с оптимизированными под новый частотный диапазон материальными параметрами, элементарная ячейка которой показана на рисунке 1.2. Массив, образовавшийся в результате трансляции данной элементарной ячейки по осям Х и У, показан на рисунке 1.3. Таким образом, в основе метаповерхности лежит плоскопараллельный слой алюминия толщиной порядка 0,8 мм, в центре расположен плоскопараллельный слой стеклотекстолита FR-4 толщиной порядка 1,5 мм, на поверхности которого периодически расположены кольцеобразные медные резонаторы толщиной порядка 50 мкм.





Вариационный анализ масштабной модели метаповерхности был произведен в среде моделирования электродинамических процессов Ansys HFSS, куда была экспортирована элементарная ячейка метаповерхности (рисунок 1.4). При этом были заданы периодические граничные условия Master-Slave, условия возбуждения структуры плоской падающий линейно-поляризованной волной Floquet ports, материальные параметры среды, выбран частотный диапазон исследования, произведена генерация полигональной сетки, а также исследованы ключевые физические процессы, происходящие при возбуждении структуры, например, генерация поверхностных токов при резонансе, плотность которого показана на рисунке 1.4, где красному цвету соответствует максимальная амплитуда тока, а синим – минимальная.



Рисунок 1.2 – Элементарная ячейка масштабной модели метаповерхности без графенового слоя и оптимизированными под новый частотный диапазон материальными параметрами, рассчитанными на возбуждение в микроволновом диапазоне частот



Рисунок 1.3 – Масштабная модель метаповерхности, полученная из элементарной ячейки (рисунок 1.2) путем ее трансляции вдоль осей X и Y



Рисунок 1.4 – Элементарная ячейка масштабной модели метаповерхности в среде моделирования

Ansys HFSS с отображением диаграммы распределения плотности поверхностных токов в кольцевых резонаторах при их возбуждении

После проведения вариационного анализа масштабной модели метаповерхности и оптимизации ее топологии был произведен экспорт полноразмерной модели в специализированные

Problems of Physics, Mathematics and Technics, № 1 (50), 2022

среды для создания управляющих программ ЧПУ фрезерной обработки Vectric Aspire, Mec-Soft VisualMill/CAM, Autodesk Fusion 360, в которых были заданы соответствующие алгоритмы обработки, а также произведен выбор режущего инструмента, параметров его подвода и отвода, безопасных высот, параметров резания и т.д. В конечном результате генерируется G-код для ЧПУ оборудования, в котором записаны все необходимые данные для обработки, такие как траектории движения инструмента, его скорости, точки начала врезания и окончания, пути подвода и отвода. На примере скриншота из Vectric Aspire на рисунке 1.5 можно видеть траектории движения режущего инструмента (синие линии) и пути перехода между зонами обработки (красные линии).



Рисунок 1.5 – Полноразмерная масштабная модель метаповерхности в среде для создания управляющих программ ЧПУ фрезерной обработки Vectric Aspire. Показаны траектории движения режущего инструмента (синие линии) и пути перехода между зонами обработки (красные линии)

#### 2 Создание опытных образцов для проведения экспериментальных исследований

В рамках работы по созданию ультратонких частотно- и поляризационно-селективных поглощающих электромагнитное излучение метаповерхностей многопикового поглощения было предложено использование плоскопараллельных структур с кольцевыми резонаторами переменного диаметра, имеющих плоский металлический слой у основания [1].

Наличие нескольких пиков поглощения отличает данные структуры от исследуемых нами ранее метаповерхностей, основанных на резонаторах омегаобразной формы [6]–[8]. Основываясь на данных разработанной ранее численной компьютерной модели метаповерхности были определены ее оптимальная форма, размеры, материальные параметры составляющих компонентов. Данные компьютерного моделирования были также использованы для создания управляющих программ, необходимых для ЧПУ (числовое программное управление) оборудования при создании экспериментальных образцов трехмерной модели метаповерхности с центральной частотой операционного диапазона многопикового поглощения возбуждения порядка ЗГГц. По результатам данных исследований были предложены два типа метаповерхностей, схожих по форм-фактору, но отличающихся составом используемых при изготовлении материалов. В основе первого типа метаповерхности расположен плоскопараллельный слой алюминия толщиной порядка 0,8 мм, в центре находится плоскопараллельный слой стеклотекстолита FR-4 толщиной порядка 1,5 мм, на поверхности которого периодически расположены кольцеобразные медные резонаторы толщиной порядка 50 мкм. В основе второго типа метаповерхности также находится плоскопараллельный слой алюминия толщиной порядка 0,8 мм, над которым расположен плоскопараллельный слой монолитного поликарбоната толщиной 2 мм, в котором сделаны концентрические пазы 0,5 мм, заполненные смесью порошков меди и титана с использованием акрила в качестве фиксирующего агента.

В процессе изготовления данных типов метаповерхностей их трехмерные модели импортировались в специализированную среду Vectric Aspire для составления управляющей программы обработки образца на оборудовании с ЧПУ Cutter HD (CNC-Technology) под управлением Mach 3.

Следует также отметить, что были рассмотрены варианты создания образцов метаповерхностей с использованием аддитивных технологий послойной 3D печати, при этом для изготовления среднего слоя метаповерхности рассматривались пластики типов PLA, PET-G, а для изготовления кольцевых резонаторов - проводящий электрический ток пластик FLEX-conductive. При этом модель предварительно импортировалась в специализированный слайсер для составления программ послойной печати 3D принтером Anycubic Predator. Метод послойной 3D печати отлично подходит для изготовления сложных моделей метаповерхностей, однако, в то же время, имеет ряд ограничений, а именно – не позволяет создать образец больших размеров без необходимости состыковок 3D напечатанных частей, что вызвано ограниченной рабочей зоной печати 3D принтера; 3D печать ограничивается специализированными пластиками, электродинамические свойства которых могут не соответствовать модельным значениям, так, например, кольцевые резонаторы, напечатанные пластиком FLEXconductive, не способны обеспечить расчетную электропроводимость для эффективного поглощения излучения. В то время как при изготовлении классическими методами использовалась возможность формовки проводящих кольцевых резонаторов из металлических порошков по заданному шаблону в диэлектрическом слое метаповерхности, что позволило регулировать электропроводимость посредством смешивания различных металлических порошков в различных пропорциях и, соответственно, тем самым контролировать поглощающие свойства метаповерхности. При формовке использовались металлические мелкодисперсные порошки меди и титана (3:1), при этом акриловый наполнитель использовался в качестве фиксирующего компонента.

Таким образом, на базе ранее исследуемых электродинамических моделях метаповерхностей были изготовлены два опытных образца, соответствующие описанным выше двум типам метаповерхностей, которые показаны на рисунках 2.1, 2.2. При изготовлении метаповерхности многопикового поглощения излучения первого типа, показанной на рисунке 2.1, в качестве основы для кольцевых резонаторов и диэлектрического слоя (подложки) использовался фольгированный медью стеклотекстолит FR-4 (диэлектрическая проницаемость стеклотекстолита на частоте 1 МГц порядка 5, тангенс угла потерь на этой же частоте порядка 0,025, поверхностное сопротивление порядка 10<sup>5</sup> МОм, объемное сопротивление порядка 10<sup>5</sup> МОм). При изготовлении образца второго типа, показанного на рисунке 2.2, в качестве лиэлектрического слоя использовался монолитный поликарбонат (диэлектрическая проницаемость на частоте 1 МГц порядка 2,6, тангенс угла потерь на этой же частоте порядка 0,008, удельное сопротивление порядка  $10^{15}$  Ом·см). Стоит отметить важное преимущество полученных образцов – их толщина – в несколько десятков раз меньше центральной резонансной длины волны поглощения.



Рисунок 2.1 – Изготовленный экспериментальный образец метаповерхности первого типа на основе фольгированного медью стеклотекстолита

Метаповерхность проектировалась с учетом того, что резонансная длина волны возбуждения  $\lambda_{res} = 100$  мм, соответствующая частоте 3 ГГц, находится в центре операционного диапазона многопикового поглощения, соответственно внешние диаметры кольцевых резонаторов были выбраны равными 21,2 мм, 22,6 мм, 25,6 мм, а расстояние между внутренним и внешним

Проблемы физики, математики и техники, № 1 (50), 2022

кольцами 8,8 мм, период трансляции кольцевых резонаторов каждого типа во взаимно-ортогональных направлениях P = 62 мм.



Рисунок 2.2 – Изготовленный экспериментальный образец метаповерхности второго типа на основе монолитного поликарбоната и мелкодисперсных металлических порошков

### 3 Экспериментальное исследование электромагнитных характеристик созданных опытных образцов

Экспериментальные исследования слабоотражающих ультратонких поглощающих электромагнитное излучение метаповерхностей проводились в модернизированной безэховой камере лаборатории «Физики волновых процессов» УО ГГУ им. Ф. Скорины. Камера имеет размеры 4,5 × 11,4 × 3,1 м и обладает уровнем безэховости в цилиндрической области D = 30 см по горизонтальной оси симметрии порядка -40 дБ, при этом по своей структуре является электролинамически изолированной от внешних электромагнитных воздействий клеткой Фарадея с толщиной листовой стали 0,8 мм. Внутренние поверхности камеры покрыты поглотителем микроволнового излучения «ТОРА-25», за исключением покрытия поверхности входной двери, для которой использовался поглотитель «ТОРА-9». Данный тип поглотителя представляет собой диэлектрический радиопоглощающий материал пирамидального типа в виде панелей из эластичного пенополиуретана с углеродным наполнителем, предназначенный для поглощения излучения и, тем самым, предотвращения его отражения от металлических стенок клетки Фарадея, обеспечивая рабочий диапазон измерений 1-37,5 ГГц с коэффициентом отражения -25 ÷ -50 дБ для ТОРА-25 и -10 ÷ -45 дБ для ТОРА-9.

Коэффициент поглощения A излучения экспериментальными образцами рассчитывался по полученным данным измерения комплексных коэффициентов передачи и отражения, посредством расчета коэффициентов прохождения T и отражения R, а именно,  $A = 1 - T - R = 1 - |t^2| - |r^2|$ [9], [10]. Результаты данных расчетов проиллюстрированы на рисунке 3.1 для случая нормального падения излучения на образец и на рисунке 3.2

Problems of Physics, Mathematics and Technics, № 1 (50), 2022

для случая падения излучения под углом 30°. Полученные данные позволяют утверждать, что экспериментальные образцы удовлетворяют основной цели, заложенной при их проектировании, а именно, реализации многопикового режима поглощения в довольно узкой полосе частот. В данном случае одновременно для обеих мод поляризации осуществляется трехпиковый режим поглощения. Пиковые значения поглощения излучения для образца № 1 оказались в соответствии с рассчитываемыми значениями, однако амплитудные значения пиков поглощения для второго образца несколько ниже ожидаемых, что может быть связано с отличием материальных параметров металлических порошков, используемых при формовке кольцевых резонаторов, а также материальных параметров подложки, на которой они располагались, от тех, которые были заложены при расчетах и моделировании из-за наличия посторонних примесей, окислов или других факторов.



При исследовании коэффициента отражения излучения от образца под углом можно отметить наличие ограничения по диапазону допустимых углов, связанное с довольно большой высотой пирамид поглотителя «ТОРА-25», которые начинают затенять падающее и отраженное излучение при углах порядка  $30^{\circ}$  и более. Поэтому экспериментальные исследования по наклонному падению были ограничены данной величиной угла падения. В этом случае, как можно видеть из рисунков 3.1 (*a*) и 3.2 (*б*), высоты пиков поглощения оказались незначительно ниже тех, что наблюдаются при нормальном падении излучения, при этом для ТМ моды поляризации образовывается дополнительный пик в области высоких частот исследуемой полосы поглощения.





#### Заключение

Основываясь на принципе электродинамической масштабной инвариантности было произведено перемасштабирование модели метаповерхности поглотителя излучения в среде моделирования Ansys SpaceClaim & DSM под новый частотный диапазон с центром порядка 3 ГГц. Проведен вариационный анализ параметров элементарной ячейки массива метаповерхности в среде моделирования Ansys HFSS в результате чего были определены оптимальные параметры для наиболее эффективного поглощения. Полученный из элементарной ячейки путем ее трансляции полноразмерный массив масштабной метаповерхности был экспортирован в специализированные среды для генерации G-кода – управляющих программ – для оборудования с числовым программным управлением с целью последующего изготовления экспериментальных образцов исследуемой метаповерхности и исследования ее электродинамических характеристик в безэховой камере.

Разработаны несколько экспериментальных образцов метаповерхностей с целью создания ультратонких частотно- и поляризационно-селективных поглощающих электромагнитное излучение метаповерхностей многопикового поглощения. Было предложено использования металлических порошков для получения кольцевых резонаторов заданной формы и проводимости методом формовки. Использование современных программ автоматизированного проектирования, а также аддитивных средств производства (3D принтеры, оборудование с числовым программным управлением) позволило изготовить образцы с высокой точностью, необходимой для проведения исследований.

Проведены экспериментальные исследования разработанных образцов метаповерхности. Полученные результаты находятся в соответствии с проектируемыми функциональными возможностями разрабатываемого поглотителя излучения. Образец с цельнометаллическими кольцевыми резонаторами показал более высокие амплитуды пиков поглощения в сравнении с образцом, в котором кольцевые резонаторы выполнены из металлических порошков.

Результаты данного исследования могут быть использованы при проектировании устройств и материалов, необходимых для создания поляризационных фильтров и коммутаторов микроволнового излучения нового типа, основанных на концепции многопикового поглощения, например, селективных по частоте и поляризации отражателей, прерывателей, преобразователей поляризации излучения [11]–[24].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Inversion Method Characterization of Graphene-Based Coordination Absorbers Incorporating Periodically Patterned Metal Ring Metasurfaces / Z. Bao [et al.] // Nanomaterials. – 2020. – Vol. 10, № 1102. – P. 1–10.

2. Independent tunable multi-band absorbers based on molybdenum disulfide metasurfaces / J. Wang [et al.] // Physical Chemistry Chemical Physics. – 2019. – Vol. 21, № 43. – P. 24132–24138.

3. Perfect Narrowband Absorber Based on Patterned Graphene-Silica Multilayer Hyperbolic Metamaterials / Y. Feng [et al.] // Plasmonics. – 2020. – P. 1–6. 4. Characteristics of a bidirectional multifunction focusing and plasmon-launching lens with multiple periscope-like waveguides / T. Xing [et al.] // Opt. Express. – 2020. – Vol. 28, № 14/6. – P. 20334– 20344.

5. THz Phase Modulation with Broadband Metasurfaces for Controlling Light Propagation / J. Ma [et al.] // Problems of Physics, Mathematics and Technics.  $-2018. - N_{\odot} 3 (36). - P. 28-31.$ 

6. Ground-plane-less bidirectional terahertz absorber based on omega resonators / A. Balmakou, M. Podalov, S. Khakhomov, D. Stavenga, I. Semchenko // Opt. Lett. – 2015. – Vol. 40, № 9. – P. 2084–2087.

7. Designing of ultra-thin electromagnetic sensor using omega-particles / A. Balmakou [et al.] // Proc. of Chinese-Belarussian Workshop (Nanjing). – Nanging, China. – 2019. – P. 9–10.

8. Radiation of circularly polarized microwaves by a plane periodic structure of  $\Omega$  elements / I.V. Semchenko // J. Commun. Technol. Electron. – 2007. – Vol. 52, No 9. – P. 1002–1005.

9. Broadband reflectionless metasheets: Frequency-selective transmission and perfect absorption / V.S. Asadchy [et al.] // Phys. Rev. X. – 2015. – Vol. 5, № 3. – P. 031005.

10. Planar Broadband Huygens' Metasurfaces for Wave Manipulations / F.S. Cuesta [et al.] // IEEE Trans. Antennas Propag. – 2018. – Vol. 66, № 12. – P. 7117.

11. Functional Metamirrors Using Bianisotropic Elements / V.S. Asadchy [et al.] // Phys. Rev. Lett. – 2015. – Vol. 114. – P. 095503.

12. Asadchy, V. S. Bianisotropic metasurfaces: physics and applications / V.S. Asadchy, A. Díaz-Rubio, S.A. Tretyakov // Nanophotonics. – 2018. – Vol. 7, № 6. – P. 1069–1094.

13. Electromagnetic waves in artificial chiral structures with dielectric and magnetic properties / I.V. Semchenko [et al.] // Electromagnetics. -2001. - Vol. 21, No 5. - P. 401–414.

14. Semchenko, I.V. Artificial uniaxial bianisotropic media at oblique incidence of electromagnetic waves / I.V. Semchenko, S.A. Khakhomov // Electromagnetics. – 2002. – Vol. 22, № 1. – P. 71–84.

15. Stored and absorbed energy of fields in lossy chiral single-component metamaterials / I. Semchenko [et al.] // Physical Review B. – 2018. – Vol. 97, № 1. – P. 014432.

16. Investigation of electromagnetic properties of a high absorptive, weakly reflective metamaterialsubstrate system with compensated chirality / I.V. Semchenko [et al.] // Journal of Applied Physics. - 2017. - Vol. 121. - P. 015108-1-015108-8.

17. Semchenko, I.V. Helices of optimal shape for nonreflecting covering / I.V. Semchenko, S.A. Khakhomov, A.L. Samofalov // The European physical journal. Applied physics. -2010. - Vol. 49,  $N_{\rm P} 3. - ap09156$ .

18. Семченко, И.В. Электромагнитные волны в метаматериалах и спиральных структурах: монография / И.В. Семченко, С.А. Хахомов. – Минск: Беларуская навука, 2019. – 279 с.

19. Design of the Chiral Metamaterials / S. Yaoliang [et al.]. – Tsinghua University Press, 2021. – 297 p.

20. Метаматериалы и метаповерхности / И.В. Семченко [и др.] // Наука и инновации. – 2020. – № 8 (210). – С. 23–27.

21. Optimal angular stability of reflectionless metasurface absorbers / J.P. del Risco [et al.] // Phys. Rev. – 2021. – B 103. – P. 115426.

22. High-performance terahertz refractive index sensor based on hybrid graphene Tamm structure / Hu Jinlei [et al.] // Journal of the Optical Society of America B. – 2021. – Vol. 38, № 9. – P. 2543–2550.

23. Multi-focusing metalenses based on quadrangular frustum pyramid-shaped nanoantennas / Zhao Shaoguang [et al.] // Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications. – 2021. – Vol. 46. – P. 100957.

24. High-Performance Tunable Multichannel Absorbers Coupled with Graphene-Based Grating and Dual-Tamm Plasmonic Structures / J. Hu [et al.] // Plasmonics – 2021. – № 17. – P. 287–294. – DOI: https://doi.org/10.1007/s11468-021-01526-2.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, договоры № Ф20ПТИ-007, № Ф22КИ-016.

Поступила в редакцию 28.12.2021.

#### Информация об авторах

Балмаков Алексей Петрович – к.ф.-м.н., доцент Хахомов Сергей Анатольевич – д.ф.-м.н., доцент

Семченко Игорь Валентинович – чл.-корр. НАН РБ, д.ф.-м.н., профессор Дживен Ли – профессор

Дживен Ли – профес

*Джиченг Ванг* – профессор *Вэй Сонг* – профессор

Вэи Сонг – профессор