

## ТЕРМИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМАЯ ТЕРАГЕРЦОВАЯ ГИПЕРЛИНЗА

И.А. Фаняев<sup>1</sup>, Д.В. Слепенков<sup>1</sup>, А.Ю. Кравченко<sup>1</sup>, И.В. Семченко<sup>2</sup>, Д. Ли<sup>3</sup>,  
С.А. Хахомов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины

<sup>2</sup>ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», Минск

<sup>3</sup>Научная школа, Университет Цзяннань

## THE THERMALLY CONTROLLED TERAHERTZ HYPERLENS

I.A. Fanyaev<sup>1</sup>, D.V. Slepiankou<sup>1</sup>, A.Y. Kravchenko<sup>1</sup>, I.V. Semchenko<sup>2</sup>, J. Li<sup>3</sup>,  
S.A. Khakhomov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Francisk Skorina Gomel State University

<sup>2</sup>SNPO "Optics, Optoelectronics, and Laser Technology", Minsk

<sup>3</sup>School of Science, Jiangnan University

**Аннотация.** Предложена усовершенствованная конструкция управляемой цилиндрической гиперлинзы, созданной на базе чередующихся слоев антимонида индия и кремния. Эта конструкция предназначена для получения изображений с субволновым разрешением в терагерцовом диапазоне. С использованием численного моделирования продемонстрирована способность динамической перестройки гиперлинзы в широком диапазоне частот при изменении температуры. Основными характеристиками этой структуры являются небольшие размеры, низкие потери в диэлектрике и способность формирования изображений сверхвысокого разрешения. Это исследование может способствовать улучшению разрешения систем визуализации в терагерцовом диапазоне, а также содействовать развитию систем визуализации изображений и зондирования со сверхвысоким разрешением, работающих в этом диапазоне.

**Ключевые слова:** гиперлинза, температура, численное моделирование, ТГц диапазон.

**Для цитирования:** Термически управляемая терагерцовая гиперлинза / И.А. Фаняев, Д.В. Слепенков, А.Ю. Кравченко, И.В. Семченко, Д. Ли, С.А. Хахомов // Проблемы физики, математики и техники. – 2023. – № 3 (56). – С. 32–37. – DOI: [https://doi.org/10.54341/20778708\\_2023\\_3\\_56\\_32](https://doi.org/10.54341/20778708_2023_3_56_32). – EDN: CCFYWF

**Abstract.** The presented article proposes an improved design of a controllable cylindrical hyperlens based on alternating layers of indium antimonide and silicon. This design is intended for obtaining sub-wavelength resolution images in the terahertz range. Using numerical simulation, the ability of dynamic tuning of the hyperlens over a wide frequency range by varying the temperature is demonstrated. The key characteristics of this structure include small dimensions, low losses in the dielectric, and the ability to form images with super-high resolution. This research can contribute to enhancing the resolution of visualization systems in the terahertz range, as well as promoting the development of ultra-high resolution imaging and probing systems operating in this range.

**Keywords:** hyperlens, temperature, numerical simulation, THz range.

**For citation:** The thermally controlled terahertz hyperlens / I.A. Fanyaev, D.V. Slepiankou, A.Y. Kravchenko, I.V. Semchenko, J. Li, S.A. Khakhomov // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2023. – № 3 (56). – P. 32–37. – DOI: [https://doi.org/10.54341/20778708\\_2023\\_3\\_56\\_32](https://doi.org/10.54341/20778708_2023_3_56_32) (in Russian). – EDN: CCFYWF

**Введение**

В настоящий момент создаются разнообразные устройства, способные генерировать и обнаруживать ТГц излучение, однако возможности для управления этим излучением остаются ограниченными. Это затрудняет развитие многих перспективных применений в области электроники и фотоники. В отличие от многих других диапазонов частот, терагерцовые волны способны проникать в различные непроводящие материалы и позволяют анализировать молекулярную структуру естественных веществ, облегчая идентификацию различных соединений [1]. Это позволяет применять современные методы

терагерцовой спектроскопии и визуализации для решения широкого спектра фундаментальных и прикладных задач в различных областях исследования [2]–[7]. Интерес к электромагнитным волнам в ТГц диапазоне обусловлен их потенциалом для эффективного использования в новаторских приложениях, таких как системы терагерцового изображения, медицинские сканеры, системы безопасности и контроля, мониторинг атмосферных условий, космические коммуникационные системы и т. д. [1], [8], [9].

В большинстве разных систем ученые стремятся получить высококачественное визуальное представление объектов, подлежащих изучению.

При получении терагерцовых изображений основной трудностью является ограниченное разрешение, связанное со значительно большей длиной волны по сравнению с видимым светом. Для преодоления дифракционных ограничений используются разнообразные методы, например, сканирующая оптическая микроскопия ближнего поля, микроскопия со стохастической оптической реконструкцией, микроскопия с использованием насыщенного структурированного освещения и другие [10]. Однако основным ограничением таких подходов является применение высокоинтенсивного света и пошаговое сканирование поверхности образца, что приводит к замедлению сканирования и не позволяет получать полноценные изображения в реальном времени, особенно для динамических биологических объектов.

Один из перспективных методов получения субволновых изображений в терагерцовом диапазоне связан с разработкой и изготовлением гиперлинз на базе гиперболических метаматериалов [11]–[18], композитов, в которых поперечная и продольная составляющие тензора диэлектрической и/или магнитной проницаемости имеют противоположные знаки.

Метаматериалы – композиционные материалы, свойства которых обусловлены в первую очередь резонансными свойствами составляющих их элементов, а не периодической структурой как в фотонных кристаллах, интенсивно исследовались на протяжении последних 25 лет [19]–[24].

Множество гиперболических метаматериалов с субволновым разрешением, как правило, имеют статичную природу, что ограничивает их применение. При реализации активных гиперболических метаматериалов, для их перестройки используются следующие методы: изменение температуры, управление оптическим излучением, регулировка электрического или магнитного поля [1].

Существует ограниченное число материалов, которые могут быть использованы в гиперболических структурах в низкотерагерцовом диапазоне, а также позволяют осуществлять динамическую перестройку своих свойств. К таким материалам можно отнести антимонид индия и графен. Практическая реализация динамических структур метаматериала с использованием графена сталкивается с определенными трудностями из-за необходимости применения системы очень тонких электродов для регулировки химического потенциала через подачу электрического потенциала. Это также требует точного контроля и согласования между слоями и может вызвать проблемы при интеграции графена с другими материалами. В работе [13] для металлической составляющей использован антимонид индия вместе со слоями полиэтилена высокой плотности

(HDPE). Коэффициент поглощения у HDPE существенно возрастает с увеличением частоты [25]. Также в работе [13] отсутствуют результаты, которые бы подтверждали получение изображений со сверхвысоким разрешением в дальней зоне.

В данном исследовании предлагается улучшенный дизайн активной цилиндрической гиперлинзы, состоящей из чередующихся слоев антимонида индия и кремния. Этот дизайн направлен на получение изображения с субволновым разрешением в терагерцовом диапазоне частот. Использование антимонида индия позволяет динамически настраивать его дисперсионные свойства путем небольших изменений температуры, в то время как кремний, действуя как диэлектрик, обладает высоким показателем преломления и низким коэффициентом поглощения в исследуемом ТГц диапазоне. Эти характеристики позволяют создать гиперболическую структуру с небольшой толщиной и минимальными потерями. Представленная в данной работе гиперлинза обеспечивает гибкость настройки характеристик сверхвысокого разрешения. Это достигается благодаря правильному выбору геометрических параметров. При этом она остается относительно простой по конструкции и экономичной. Данная работа может способствовать улучшению систем визуализации и зондирования со сверхвысоким разрешением в терагерцовом диапазоне в режиме реального времени.

## 1 Теоретические сведения

Одним из стандартных вариантов реализации гиперболических метаматериалов является плоская структура, состоящая из чередующихся тонких слоев металла и диэлектрика. Плоская структура метаматериала с гиперболической дисперсией может передавать изображение в зоне ближнего поля без увеличения. Более интересные явления возникают, когда поверхность гиперболического метаматериала искривлена, например, в форме цилиндра или сферы. В этом случае волны, распространяющиеся в такой линзе, не только передают изначально эванесцентные волны с большей поперечной компонентой волнового числа, но и преобразуют их в распространяющиеся волны, которые можно обнаружить обычным микроскопом. Степень увеличения изображения определяется отношением радиусов на двух границах линзы. Такие увеличивающие гиперлинзы позволяют получать поля с субволновой детализацией в масштабах, превышающих длину волны, что упрощает дальнейшую обработку средствами обычной дифракционной оптики.

В качестве металла использовался InSb, диэлектрическая проницаемость которого в ТГц диапазоне может быть описана с помощью модели Друде [26]. При выборе материала для

диэлектрического слоя гиперлинзы мы руководствовались требованием к низким потерям и высокому коэффициенту преломления. Это позволит использовать более тонкие слои и, при необходимости, увеличить их количество. К примеру, в работе [13] был использован полиэтилен высокой плотности (HDPE), однако у него низкий показатель преломления и коэффициент поглощения значительно увеличивается с частотой (при 2 ТГц  $\sim 1 \text{ см}^{-1}$ ). Среди кристаллических материалов с низкими потерями наиболее подходящими являются Si и SiO<sub>2</sub>. Однако кремний с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_{\text{Si}} = 11,69$  предпочтительнее из-за его высокого показателя преломления ( $n_{\text{Si}} = 3,42$ ) и низкого коэффициента поглощения ( $0,1 \text{ см}^{-1}$ ) в широком диапазоне частот.

Для анализа гиперболической дисперсии предлагаемой гиперлинзы, то есть зависимости её диэлектрической проницаемости от диэлектрических проницаемостей слоёв, мы использовали следующие уравнения для эффективной среды в случае анизотропной многослойной структуры InSb / Si [27]:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon_{\text{InSb}} \epsilon_{\text{Si}}}{(1-p)\epsilon_{\text{InSb}} + p\epsilon_{\text{Si}}}, \quad (1.1)$$

$$\epsilon_\theta = p\epsilon_{\text{InSb}} + (1-p)\epsilon_{\text{Si}}, \quad (1.2)$$

где  $\epsilon_r$  – эффективная диэлектрическая проницаемость в направлении  $r$ , а  $\epsilon_\theta$  – эффективная диэлектрическая проницаемость в плоскости  $\theta$  (в цилиндрических координатах),  $p = t_{\text{InSb}} / (t_{\text{InSb}} + t_{\text{Si}})$  – коэффициент заполнения металла (отношение заполнения), где  $t_{\text{InSb}}$  и  $t_{\text{Si}}$  – толщины слоев InSb и Si.

## 2 Компьютерная модель

В современных условиях математическое моделирование активно применяется как важный инструмент научных исследований. Оно приходит на смену экспериментальным исследованиям и становится неотъемлемой частью научного процесса, особенно в случаях, когда проведение экспериментов или полный теоретический анализ всех аспектов изучаемого явления представляют сложности [28]. В настоящее время в лабораториях, посвященных изучению метаматериалов, для проведения численных экспериментов наиболее часто используется коммерческое программное обеспечение, основанное на методе конечных элементов.

На рисунке 2.1 показано схематическое изображение предлагаемой активной цилиндрической гиперлинзы со структурными параметрами и материалами, использованными при моделировании. Предлагаемый гиперболический метаматериал представляет собой полуцилиндр с внутренним радиусом  $r = 50 \text{ мкм}$  и толщиной  $t = 50 \text{ мкм}$  и состоит из 10 пар слоев InSb / Si с оптимизированным коэффициентом заполнения  $p = 0,65$ . Трехмерная модель гиперлинзы имеет прорези шириной 10 мкм в металлической оболочке в виде букв GSU (Gomel State University) в вертикальной ориентации. Гиперлинза возбуждается линейной  $x$ -поляризованной ( $LP_x$ ),  $y$ -поляризованной ( $LP_y$ ), круговой правой (RCP) и круговой левой (LCP) электромагнитной волной.

Гиперлинза расположена на кремниевой подложке толщиной  $L = 200 \text{ мкм}$ . Вся структура покрыта пленкой золота (Au) толщиной  $t_{\text{Au}} = 4 \text{ мкм}$ . Вся модель окружена идеальным поглощающим слоем для предотвращения нежелательных отражений от границ гиперлинзы.

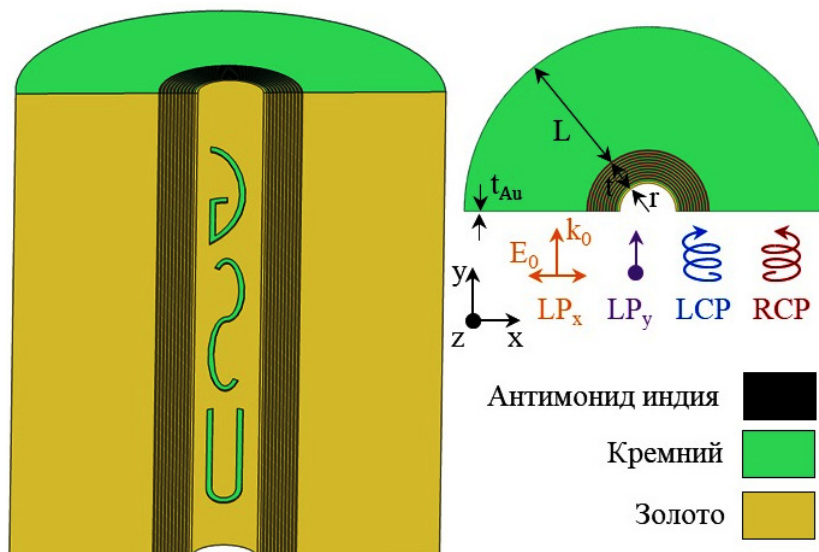


Рисунок 2.1 – Схематическое изображение цилиндрической трехмерной гиперлинзы, используемой в моделировании

### 3 Результаты компьютерного моделирования

В качестве металла мы используем InSb с диэлектрической проницаемостью, описанной уравнением (1.1) из [26]. Данный материал характеризуется тем, что имеет подходящую плотность носителей, чтобы его плазменная частота находилась в терагерцовом диапазоне, и поэтому InSb можно использовать вместо металла в гиперболических структурах.

Были проведены численные исследования эффективных параметров многослойной структуры металл / диэлектрик, которые описываются выражениями (1.1) и (1.2). На рисунке 3.1, *a* и *b* показаны зависимости радиальной и азимутальной диэлектрической проницаемости в диапазоне частот от 1,5 до 4,5 ТГц при изменении температуры. Сплошная линия относится к действительной части, а штрихпунктирная к мнимой части диэлектрической проницаемости. Следует отметить широкие пределы принимаемых значений действительной части диэлектрической проницаемости при небольших изменениях температуры. Это дает возможность осуществлять динамическую перестройку дисперсионных свойств гиперболического метаматериала в исследуемом частотном диапазоне.

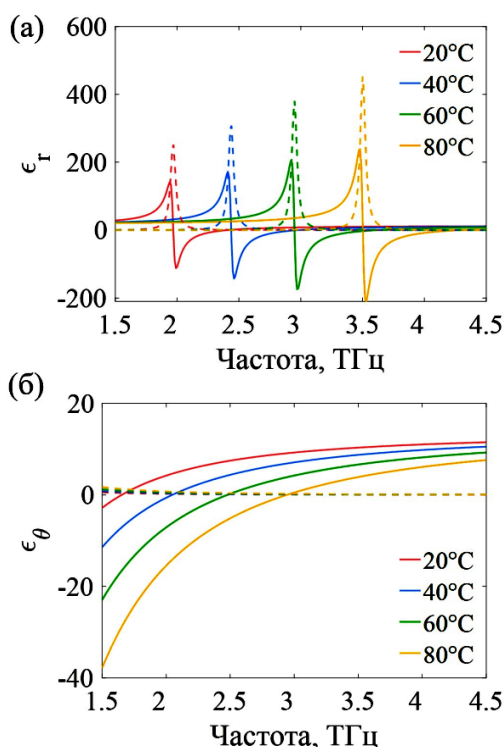


Рисунок 3.1 – Радиальная  $\epsilon_r$  (a) и азимутальная  $\epsilon_\theta$  (b) диэлектрическая проницаемость гиперлинзы при разных температурах

Из рисунка 3.1, можно выделить частотные области, где гиперболическая среда обладает свойствами среды первого или второго типа.

Второй тип среды является более предпочтительным для гиперлинзы, поскольку имеет большее значение волнового вектора. Заметим, что с понижением температуры рабочая область гиперболической среды второго типа смещается в область низких частот. Изменение температуры в небольших пределах от 20 до 80° С существенно изменяет рабочую частоту.

С помощью математического моделирования была произведена оптимизация основных параметров и рассчитана напряженность электрического поля в ближней зоне (рисунок 3.2) от гиперлинзы на частоте 2,25 ТГц при разных вариантах возбуждения и разных значениях температуры.

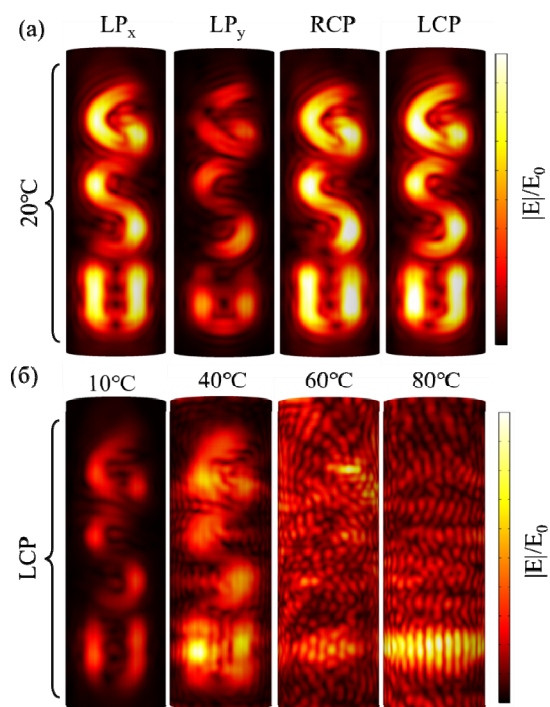


Рисунок 3.2 – Результаты моделирования напряженности электрического поля в ближней зоне при различной поляризации падающей волны (a) и распределение поля при различных температурах (b)

Анализируя полученные распределения напряженности электрического поля (рисунок 3.2, a) при различной поляризации падающего поля и установленной, комнатной температуре можно утверждать, что наиболее четкое изображение получается при левой круговой поляризации волны (LCP). Ввиду того, что размеры прорези и расстояния между буквами значительно меньше по сравнению с длиной волны ( $\lambda = 133$  мкм), можно утверждать, что изображение формируется с субволновым разрешением (порядка  $\lambda/3$ ). Без гиперлинзы изображение не формируется. Хорошее изображение надписи GSU, но с чуть меньшей интенсивностью, также получается и при линейной x-поляризованной ( $LP_x$ ) волне,

прошедшей через гиперлинзу. При других значениях температуры (рисунок 3.2, б) происходит расфокусировка надписи и снижение интенсивности поля.

Из этого можно сделать вывод, что гиперлинза на заданной частоте формирует субволновое изображение только при определенной температуре. Изменяя температуру гиперболической структуры, мы можем реализовать субдифракционную визуализацию полей, излучаемых (рассеиваемых) исследуемыми объектами.

Покажем, что предлагаемая цилиндрическая гиперлинза является перестраиваемой и формирует субволновое изображение в терагерцовом диапазоне при другой температуре. На рисунке 3.3 показаны распределения напряженности электрического поля в структуре при различной температуре и частоте.

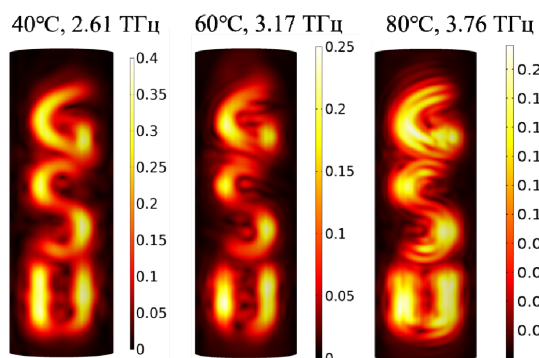


Рисунок 3.3 – Распределение напряженности электрического поля в структуре при различной температуре и частоте

Надписи получены при LCP падающей волне, выбранной температуре, на строго определенной частоте. Анализ многократно повторяемых численных экспериментов показал, что при выбранной требуемой температуре и оптимизации коэффициента заполнения металла можно четко сформировать субволновое изображение в терагерцовом диапазоне. Однако стоит отметить, что прослеживается уменьшение интенсивности поля при увеличении температуры.

Подводя итоги исследований, можно сделать вывод, что предлагаемая модель цилиндрической гиперлинзы реализует в ближней зоне субдифракционное формирование полей, излучаемых (рассеиваемых) исследуемыми объектами в широком ТГц диапазоне. Динамическая перестройка работы гиперлинзы по частоте производится за счет изменения температуры. Используемый принцип управления технологически осуществляется гораздо проще по сравнению с оптическим управлением или изменением напряженности приложенного электрического либо магнитного поля.

## Заключение

В данной статье предложена динамически управляемая цилиндрическая гиперлинза на основе чередующихся InSb / Si слоев для получения изображений с субволновым разрешением на терагерцовых частотах. С помощью численного моделирования продемонстрирована возможность перестройки гиперлинзы в частотном диапазоне от 1,5 до 4,5 ТГц при изменении температуры от 20 до 80°С. Используемый принцип управления отличается простотой по сравнению с другими способами. На основании предложенной компьютерной модели может быть изготовлена цилиндрическая гиперлинза с использованием стандартных методов напыления или электронно-лучевого испарения. Эта работа может способствовать улучшению систем визуализации изображений и зондирования со сверхвысоким разрешением для терагерцового диапазона в режиме реального времени [29]–[31].

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Электромагнитное излучение терагерцового диапазона: способы управления и возможные области применения* / И.Б. Вендик [и др.] // *Электроника и микроэлектроника СВЧ*. – 2016. – Т. 1. – С. 101–105.
2. *Graphene conductance uniformity mapping* / J.D. Buron [et al.] // *Nano letters*. – 2012. – Vol. 12, № 10. – P. 5074–5081.
3. *Terahertz pulsed spectroscopy and imaging in the pharmaceutical setting—a review* / J.A. Zeitler [et al.] // *Journal of Pharmacy and Pharmacology*. – 2007. – Vol. 59, № 2. – P. 209–223.
4. *Non-destructive evaluation of polymer composite materials at the manufacturing stage using terahertz pulsed spectroscopy* / E.V. Yakovlev [et al.] // *IEEE Transactions on Terahertz science and Technology*. – 2015. – Vol. 5, № 5. – P. 810–816.
5. *Backside observation of large-scale integrated circuits with multilayered interconnections using laser terahertz emission microscope* / M. Yamashita [et al.] // *Applied Physics Letters*. – 2009. – Vol. 94, № 19. – P. 1–8.
6. *Terahertz near-field nanoscopy of mobile carriers in single semiconductor nanodevices* / A.J. Huber [et al.] // *Nano letters*. – 2008. – Т. 8, № 11. – P. 3766–3770.
7. *Terahertz biophotonics as a tool for studies of dielectric and spectral properties of biological tissues and liquids* / O.A. Smolyanskaya [et al.] // *Progress in Quantum Electronics*. – 2018. – Vol. 62. – P. 1–77.
8. *Chan, W.L. Imaging with terahertz radiation* / W.L. Chan, J. Deibel, D.M. Mittleman // *Reports on progress in physics*. – 2007. – Vol. 70, № 8. – P. 1325.
9. *De Maagt, P. Terahertz technology for space and earth applications* / P. De Maagt // *2007 International workshop on Antenna Technology: Small and*



- Smart Antennas Metamaterials and Applications. – IEEE, 2007. – P. 111–115.
10. *Scanning near-field optical microscopy with aperture probes: Fundamentals and applications* / B. Hecht [et al.] // The Journal of Chemical Physics. – 2000. – Vol. 112, № 18. – P. 7761–7774.
  11. *Hyperbolic metamaterials and metasurfaces: fundamentals and applications* / P. Huo [et al.] // Advanced Optical Materials. – 2019. – Vol. 7, № 14. – P. 1801616.
  12. *Spherical hyperlens for two-dimensional sub-diffractive imaging at visible frequencies* / J. Rho [et al.] // Nature communications. – 2010. – Vol. 1, № 1. – P. 143.
  13. *Zhang, H. Tunable terahertz hyperbolic metamaterial slabs and super-resolving hyperlenses* / H. Zhang, Z. Jiao, E. McLeod // Applied Optics. – 2020. – Vol. 59, № 22. – P. G64–G70.
  14. *Tunable hyperbolic metamaterials based on self-assembled carbon nanotubes* / J.A. Roberts [et al.] // Nano Letters. – 2019. – Vol. 19, № 5. – P. 3131–3137.
  15. *Metal-free oxide-nitride heterostructure as a tunable hyperbolic metamaterial platform* / X. Wang [et al.] // Nano Letters. – 2020. – Vol. 20, № 9. – P. 6614–6622.
  16. *Tunable VO<sub>2</sub>/Au hyperbolic metamaterial* / S. Prayakarao [et al.] // Applied Physics Letters. – 2016. – Vol. 109, № 6. – P. 061105.
  17. *Sub-diffraction demagnification imaging lithography by hyperlens with plasmonic reflector layer* / L. Liu [et al.] // RSC advances. – 2016. – Vol. 6, № 98. – P. 95973–95978.
  18. *Металинзы для получения изображений с субволновым разрешением* / К.В. Барышникова [и др.] // Успехи физических наук. – 2022. – Т. 192 (4). – С. 386–412.
  19. *Семченко, И.В. Электромагнитные волны в метаматериалах и спиральных структурах* / И.В. Семченко, С.А. Хахомов. – Минск: Беларуская навука, 2019. – 280 с.
  20. *Investigation of electromagnetic properties of a high absorptive, weakly reflective metamaterial-substrate system with compensated chirality* / I.V. Semchenko [et al.] // Journal of Applied Physics. – 2017. – Vol. 121 (1). – P. 015108.
  21. *Radiation of circularly polarized microwaves by a plane periodic structure of  $\Omega$  elements* / I.V. Semchenko [et al.] // J. Commun. Technol. Electron. – 2007. – Vol. 52. – P. 1002–1005.
  22. *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.
  23. *Electromagnetic Waves in Artificial Chiral Structures with Dielectric and Magnetic Properties* / I.V. Semchenko, S.A. Khakhomov, S.A. Tretyakov, A.H. Sihvola // Electromagnetics. – 2001. – Vol. 21 (5). – P. 401–414.
  24. *Electromagnetics of bi-anisotropic materials: Theory and applications* / A. Serdyukov [et al.]. – Amsterdam: Gordon and Breach Science Publishers, 2001. – 337 p.
  25. *Naftaly, M. THz transmission in polymer materials – a data library* / M. Naftaly, R.E. Miles, P.J. Greenslade // 2007 Joint 32nd International Conference on Infrared and Millimeter Waves and the 15th International Conference on Terahertz Electronics. – IEEE, 2007. – P. 819–820.
  26. *Фаняев, И.А. Параметрический анализ цилиндрической гиперлинзы с субволновым разрешением для ТГц волн* / Ив.А. Фаняев, Иг.А. Фаняев, С.А. Хахомов // Проблемы физики, математики и техники. – 2022. – № 3 (52). – С. 48–55.
  27. *Agranovich, V.M. Notes on crystal optics of superlattices* / V.M. Agranovich, V.E. Kravtsov // Solid State Communications. – 1985. – Vol. 55. – P. 85–90.
  28. *Прокопьева, Л.Ю. Моделирование анизотропных метаматериалов с помощью параллельной реализации метода конечных объемов для решения нестационарных уравнений Максвелла* / Л.Ю. Прокопьева // Вычислительные технологии. – 2009. – Т. 14, № 3. – С. 58–68.
  29. *Hyperbolic metamaterial structures based on graphene for THz super-resolution imaging applications* / S. Hao [et al.] // Optical Materials Express. – 2023. – Vol. 13, № 1. – P. 247–262.
  30. *Fanyaev, I.A. Switchable Cylindrical Hyperlens for THz Band* / I.A. Fanyaev, I.A. Faniayeu, S.A. Khakhomov // IEEE Conference Proceedings. – 2022. – P. 1–3.
  31. *Subwavelength imaging amplification via electro-thermally tunable InSb-graphene-based hyperlens in terahertz frequency* / I. Fanyaev, I. Faniayeu, J. Li, S. Khakhomov // Results in Physics. – 2023. – Vol. 52. – P. 106917.
- Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, проекты Ф22КИ-016, Ф22КИТГ-021.*

Поступила в редакцию 15.08.2023.

#### Информация об авторах

Фаняев Иван Александрович – к.т.н., доцент  
 Слепенков Дмитрий Владимирович  
 Кравченко Александр Юрьевич  
 Семченко Игорь Валентинович – д.ф.-м.н., профессор,  
 чл.-корр. АН Беларуси  
 Ли Дживен – профессор Университета Цзяннань  
 Хахомов Сергей Анатольевич – д.ф.-м.н., доцент