

УДК 535.31

DOI: 10.33764/2411-1759-2021-26-6-155-163

ФОКУСИРОВКА ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МЕЗОРАЗМЕРНОЙ КУБОИДНОЙ ЛИНЗОЙ ИЗ ИСКУССТВЕННОГО ДИЭЛЕКТРИКА

Игорь Владиленович Минин

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института стратегического развития, e-mail: prof.minin@gmail.com

Олег Владиленович Минин

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института стратегического развития, e-mail: prof.minin@gmail.com

Целью работы является исследование новой мезоразмерной кубоидной линзы из искусственного диэлектрика для терагерцового диапазона длин волн. В качестве метода исследования выбрано математическое моделирование процесса. Установлено, что линза из анизотропного вдоль оптической оси искусственного диэлектрика с характерным размером 3λ способна фокусировать терагерцовое излучение на расчетной частоте 0,15 ТГц в фокусное пятно с поперечным размером, равным дифракционному пределу. При этом область фокусировки располагается вдоль оптической оси линзы. Способность фокусировать излучение сохраняется в широком диапазоне эффективного показателя преломления, по крайней мере, от 1,4 до 1,7, при этом величина фокусного расстояния меняется незначительно.

Ключевые слова: фотонная струя, мезоразмерная частица, янус-частица, искусственный диэлектрик, линза, дифракционный предел

Введение

Терагерцовый (ТГц) диапазон частот электромагнитного спектра лежит между инфракрасным диапазоном и областью миллиметровых длин волн. Граница ТГц-диапазона в настоящее время точно не определена. В более широкой интерпретации ТГц-диапазон занимает область частот от 100 ГГц до 10 ТГц или диапазон длин волн от 3 мм до 30 мкм.

ТГц-диапазон применяется в различных областях науки и техники, в устройствах дефектоскопии, интроскопии и системах радиовидения [1–5]; ведутся исследования процессов взаимодействия ТГц-излучения с различными материалами, например, биологическими тканями [6, 7], в медицине [8–11], в системах связи [12–15].

Для фокусировки терагерцового излучения применяются диэлектрические линзы, например, изготовленные из полиэтилена, фторопласта (тефлон), кремния [16–18]. Форма поверхности линзы может быть достаточно сложной, например, плоско-гиперболической либо эллиптическо-асфериче-

ской и т. д. Кроме того, для эффективной фокусировки излучения линза должна иметь большой относительный диаметр (D/λ) не менее 10–20.

Создание линз для работы в терагерцовом диапазоне длин волн затруднено тем обстоятельством, что существует лишь небольшое количество веществ с малыми потерями энергии в материале и с требуемым показателем преломления [19, 20]. Выходом из создавшейся ситуации может быть использование искусственных материалов. Терагерцовые линзы могут быть изготовлены из искусственных или метаматериалов, например, в работе [21] исследована терагерцовая линза с плоско-гиперболической поверхностью диаметром 17λ , составленная из металлических наклонных пластин и эффективным показателем преломления 1,31 на частоте 0,5 ТГц. Здесь λ – длина волны используемого излучения. Такая искусственная среда имеет эффективный показатель преломления, который зависит только от угла наклона пластин. Подобная среда для микроволновых линз была предложена более 70 лет назад [22, 23].

В искусственных материалах возможно спроектировать любой эффективный показатель преломления, как менее единицы, так и более [24–34]. Искусственные материалы на микроволнах могут представлять собой систему перфорированных пластин, упорядоченно расположенные системы сфер или дисков. Даже обычный металлический волновод с прямоугольным или круглым сечением может рассматриваться как искусственная среда с эффективным показателем преломления менее единицы. Для проектирования терагерцовых линз используются и более сложные конструкции, например [28–41].

Относительно недавно, в 2004 г., впервые было обращено внимание на наличие эффекта фотонной наноструи при исследовании рассеяния лазерного излучения на прозрачных кварцевых микроцилиндрах и позднее – на сферических частицах. Фотонная струя возникает в области теневой поверхности диэлектрических микросферических частиц – в так называемой ближней зоне дифракции. Фотонная струя характеризуется сильной пространственной локализацией и высокой интенсивностью оптического поля в области фокусировки. Возможность получения фотонных струй была изучена для диэлектрических частиц эллиптической формы поверхности, усеченных сфер и частиц, не обладающих осевой симметрией. Обзор современного состояния по формированию фотонной струи диэлектрическими частицами произвольной формы в электромагнитном спектре приведен в работах [42–46]. Особенностью таких мезо-

размерных диэлектрических частиц является их способность фокусировать излучение с характерным размером не менее длины волны используемого излучения.

В терагерцовом диапазоне длин волн фокусировку излучения возможно осуществить кубоидной мезоразмерной диэлектрической частицей [47, 48].

Основные результаты исследования

В этой работе мы продемонстрируем возможность фокусировки терагерцового излучения мезоразмерной кубоидной линзой из искусственного диэлектрика в виде решетки наклонных пластин. Мы покажем, что эта искусственная кубоидная диэлектрическая линза может фокусировать терагерцовые волны так же, как это делает обычная диэлектрическая кубоидная линза, и с разрешением, равным дифракционному пределу.

Принцип действия такой искусственной среды заключается в том, чтобы заставить волны двигаться между наклонно расположенными пластинами. В этом случае проходимость возрастает в $1/\cos\theta$ раз, что соответствует эффективному показателю преломления по отношению к распространению волн в свободном пространстве $n = 1/\cos\theta$.

В таком искусственном диэлектрике эффективный показатель преломления зависит только от угла наклона пластин решетки. В таблице приведены значения эффективного показателя преломления $N_{эф}$ в зависимости от угла наклона пластин.

Зависимость эффективного показателя преломления $N_{эф}$ от угла наклона пластин

| Параметры сравнения | Значения показателя | | | | | | | |
|--------------------------------------|---------------------|------|------|------|------|------|------|----|
| Эф. показатель преломления, $N_{эф}$ | 1 | 1,02 | 1,06 | 1,15 | 1,31 | 1,56 | 1,74 | 2 |
| Угол наклона пластин | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 55 | 60 |

На первый взгляд кажется, что наклонное положение пластин решетки приводит к изменению направления распространения терагерцовой волны. Учет принципа Гюйгенса – Френеля и суммирование элементарных волн, зарождающихся за щелями между полосками, показывает, что возможна фоку-

сировка падающей волны с плоским волновым фронтом.

В данном случае искусственная среда похожа на обычные диэлектрические среды, используемые в оптических линзах. Поскольку в оптических линзах формируется волновой фронт распространяющегося излучения за

счет непрерывного изменения фазы волны или величины расстояния, проходимого волной, за счет толщины или эффективного показателя преломления материала, то и в данном искусственном материале происходит так же изменение величины расстояния распространяющегося излучения, но с шагом, пропорциональным расстоянию между параллельными пластинами.

Кубоидная линза из искусственного диэлектрика состоит из решетки пластин, расположенных под углом к падающему излучению, выполненных из меди толщиной 0,1 мм и образующих куб с величиной ребра, равной 3λ . Расстояние между пластинами выбиралось менее $\lambda/2$, примерно $0,4\lambda$. При уменьшении расстояния между пластинами увеличивается «однородность» искусственного ди-

электрика, но может уменьшаться величина интенсивности поля, проходящего через такую среду. Эффективный показатель преломления линзы изменялся от 1,4 до 1,7.

На рис. 1, а показаны терагерцовая кубоидная линза с размером ребра 3λ , состоящая из металлической решетки, составленная из полос равной толщины и наклоненных по отношению к падающему излучению, и результат моделирования фокусировки излучения. Прямая поперечная белая линия проведена через максимум интенсивности электромагнитного поля в области фокуса. На рис. 1, б показана аналогичная терагерцовая кубоидная линза из однородного диэлектрика и результат моделирования фокусировки терагерцовой волны с плоским падающим фронтом.

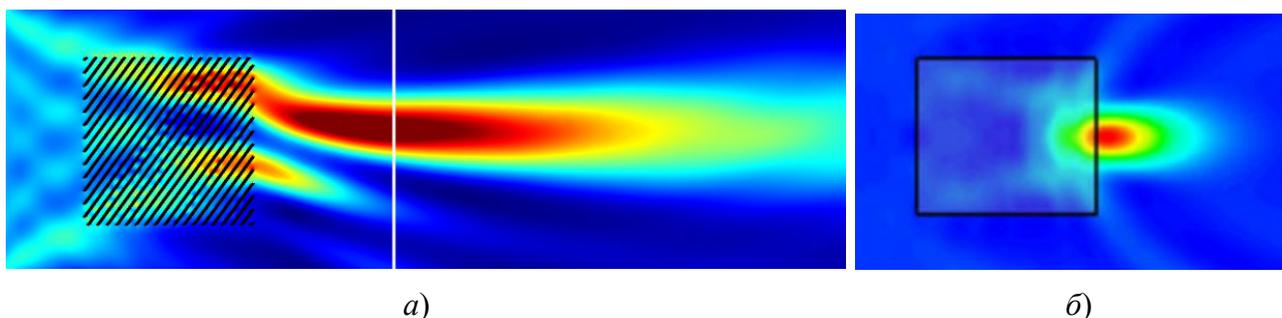


Рис. 1. Мезоразмерная кубоидная линза:

а) терагерцовая кубоидная линза с размером ребра 3λ , состоящая из металлической решетки, составленная из полос равной толщины, наклоненных по отношению к падающему излучению, а также результат моделирования фокусировки излучения; б) терагерцовая кубоидная линза из однородного диэлектрика и результат моделирования фокусировки терагерцовой волны с плоским падающим фронтом

Результаты моделирования демонстрируют эффект фокусировки излучения для кубоидной линзы из однородного диэлектрика. Область фокуса возникает непосредственно на теневой поверхности линзы, вдоль ее оптической оси, однако для линзы из искусственного диэлектрика это не так. Распределение электромагнитного поля за теневой поверхностью линзы не симметрично и смещено поперек оптической оси линзы, так как структура кубоидной линзы из металлических наклонных пластин асимметрична вдоль направления падения волны. Область фокусировки имеет большую протяженность вдоль оптической оси линзы,

и максимум интенсивности электромагнитного поля находится дальше от теневой поверхности линзы.

Мы предлагаем новую структуру металлической решетки кубоидной линзы. Терагерцовая линза в форме кубоида состоит из решетки параллельных пластин, установленных под углом $+\theta$ или $(180 - \theta)$ к падающему излучению выше оптической оси линзы, и под углом $-\theta$ или $-(180 - \theta)$ ниже оптической оси линзы, шириной пластин равных длине грани кубоида.

Выполнение решетки параллельных пластин, установленных под углом $+\theta$ или $(180 - \theta)$ к падающему излучению выше оптической оси

линзы и под углом $-\theta$ или $-(180 - \theta)$ ниже оптической оси линзы, позволяет сформировать область фокуса на оптической оси линзы. В результате дифракции электромагнитной волны на углах кубоида и интерференции волн, прошедших через линзу, формируется область фокусировки вдоль оптической оси кубоида. На рис. 2 приведены результаты моделирования

фокусировки терагерцовой волны с плоским падающим фронтом на частоте 0,15 ТГц кубоидной линзой с величиной ребра 3λ с различными эффективными показателями преломления: 1,40, 1,45, 1,50, 1,55, 1,60, 1,65, 1,70 и линзы с искусственной средой в виде решетки параллельных пластин установленных под углом $(180 - \theta)$.

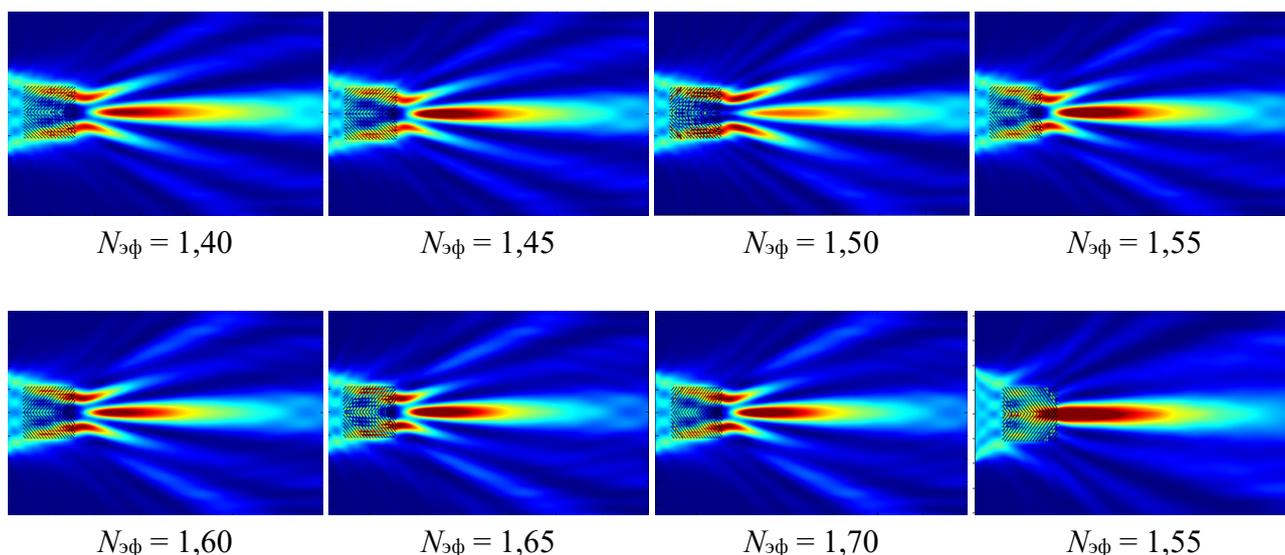


Рис. 2. Результаты моделирования фокусировки терагерцовой волны с плоским падающим фронтом на частоте 0,15 ТГц кубоидной линзой с величиной ребра 3λ с различными эффективными показателями преломления: 1,40, 1,45, 1,50, 1,55, 1,60, 1,65, 1,70 и линзы с искусственной средой в виде решетки параллельных пластин, установленных под углом $(180 - \theta)$

Результаты моделирования показывают возможность и качество фокусировки терагерцовой кубоидной линзы из искусственного диэлектрика. С увеличением значения эффективного показателя преломления материала линзы увеличивается ее пространственное разрешение. Так, для показателя преломления искусственного материала линзы, равного 1,40, пространственное разрешение составляет $0,52\lambda$, для показателя преломления 1,50 – $0,51\lambda$ и для показателя преломления 1,70 достигает предельного разрешения для идеального объектива $0,50\lambda$. Установлено, что кубоидная линза обладает фокусирующей способностью, зависящей от ее ориентации, обусловленной анизотропией искусственной среды. Таким образом, эта линза обладает свойствами фокусирующей янус-частицы.

В дальнейшем мы предполагаем исследовать кубоидную терагерцовую линзу с боль-

шими значениями эффективного показателя преломления, зависимость разрешения линзы от ее характерного размера и с измененной структурой решетки с углом наклона пластин, равным $(180 - \theta)$.

Достоинством предлагаемой кубоидной терагерцовой линзы является независимость ее фокусирующих свойств от параметров окружающей среды, так как материал окружающей среды находится в структуре линзы, а ее относительный показатель преломления зависит только от физической длины параллельных пластин или от угла наклона этих пластин по отношению к падающему излучению. По сравнению с однородными диэлектрическими терагерцовыми линзами предлагаемая линза обладает достаточной прочностью, надежностью и возможностью выбора необходимого эффективного показателя преломления материала.

Другим преимуществом предлагаемой линзы является возможность ее использования в акустическом диапазоне длин волн.

Заклучение

Мы разработали мезоразмерную кубоидную линзу из искусственного диэлектрика для терагерцового диапазона длин волн. Наши результаты показывают, что эта линза с характерным размером 3λ способна фокусировать терагерцовое излучение на расчетной частоте 0,15 ТГц в фокусное пятно с попереч-

ным размером, равным дифракционному пределу; при этом область фокусировки располагается вдоль оптической оси линзы. Способность фокусировать излучение сохраняется в широком диапазоне эффективного показателя преломления, по крайней мере, от 1,4 до 1,7, при этом величина фокусного расстояния меняется незначительно. Эта работа подчеркивает важность применения технологии искусственного диэлектрика для разработки будущих ТГц-устройств, например, предназначенных для устройств терагерцовой визуализации и связи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Lee Y.-S. Principles of Terahertz Science and Technology. – Berlin : Springer, 2009. – P. 159–170.
2. Handbook of terahertz technology for imaging, sensing and communications / Edited by Daryoosh Saeedkia. – Cambridge : Woodhead Publishing, 2013. – 688 p.
3. Siegel P. H. Terahertz techonlogy // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2002. – Vol. 50, No 3. – P. 910–928.
4. De Maagt P., Bolivar P. H., Mann C. Terahertz science, engineering and systems – from space to earth applications // Wiley Encyclopedia of RF and Microwave Engineering / ed. by K. Chang. – N. Y. : Wiley-Interscience, 2005. – P. 5176–5194.
5. Wade C. G., Šibalić N., de Melo N. R., Kondo J. M., Adams C. S., Weatherill K. J. Real-time near-field terahertz imaging with atomic optical fluorescence // Nat. Photonics. – 2017. – Vol. 11. – P. 40–43.
6. Reid C. B., Reese G., Gibson A. P., Wallace V. P. Terahertz time-domain spectroscopy of human blood // Transactions of Terahertz Science and Technology. – 2013. – Vol. 3, No 4. – P. 363–367.
7. Saviz M., Spathmann O., Streckert J., Hansen V., Clemens M., Faraji-Dana R. Theoretical estimation of safety thresholds for terahertz exposure of surface tissues // Transactions of Terahertz Science and Technology. – 2013. – Vol. 3, No 5. – P. 635–640.
8. Taylor Z. D., Singh R. S., Bennett D. B., Tewari P., Kealey C. P., Bajwa N., Culjat M. O., Stojadinovic A., Lee H., Hubschman J. P., Brown E. R. Grundfest WS. THz medical imaging: in vivo hydration sensing // IEEE Transactions of Terahertz Science and Technology. – 2011. – Vol. 1, No 1. – P. 201–219.
9. Ajito K., Ueno Y. THz chemical imaging for biological applications // IEEE Transactions of Terahertz Science and Technology. – 2011. – Vol. 1, No 1. – P. 293–300.
10. Woodward R. M., Cole B. E., Wallace V. P., Pye R. J., Arnone D. D., Linfield E. H., Pepper M. Terahertz pulse imaging in reflection geometry of skin cancer and skin tissue // Physics in Medicine and Biology. – 2002. – Vol. 47. – P. 3853–3855.
11. Hirmer M., Danilov S. N., Giglberger S., Putzger J., Niklas A., Jager A., Hiller K. A., Loffler S., Schmalz G., Redlish B., Schulz I., Monkman G., Ganichev S. D. Spectroscopic study of human teeth and blood visible to terahertz frequencies for clinical diagnostics of dental pulp vitality // International Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves. – 2012. – Vol. 33. – P. 366–375.
12. Federici J., Moeller L. Review of terahertz and subterahertz wireless communications // Journal of Applied Physics. – 2010. – Vol. 107, No 11. – Article ID 111101. – 22 p.
13. Song H.-J., Nagatsuma T. Present and future of terahertz communications // IEEE Transactions of Terahertz Science and Technology. – 2011. – Vol. 1, No 1. – P. 256–263.
14. Nagatsuma T., Horiguchi S., Minamikata Y., Yoshimizu Y., Hisatake S., Kuwano S., Yoshimoto N., Terada J., Takahashi H. Terahertz wireless communications based on photonics technologies // Optics Express. – 2013. – Vol. 21, No 21. – P. 23736–23747.
15. Nagatsuma T., Ducournau G., Renaud C. C. Advances in terahertz communications accelerated by photonics // Nat. Photonics. – 2016. – Vol. 10. – P. 371–379.
16. Yat Hei Lo, Rainer Leonhardt. Aspheric lenses for terahertz imaging // Optic Express. – 2008. – Vol. 16, No. 20. – P. 15991–15998.

17. Dewey R. J. Design considerations for millimeter wave lens antennas // *The Radio and Electronic Engineer*. – 1982. – Vol. 52. – P. 551–558.
18. Cloutier G. G., Bekefi G. Scanning characteristics of microwave aplanatic lenses // *IRE Transactions on Antennas and Propagation*. – 1957. – Vol. AP-5, P. 391–396.
19. Nazarov M. M., Shilov A. V., Bzheumikhov K. A., Margushev Z. C., Sokolov V. I., Sotsky A. B., Shkurinov A. P. Eight-capillary cladding THz waveguide with low propagation losses and dispersion // *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* – 2018. – Vol. 8. – P. 183–191.
20. Ali S., Ahmed N., Aljunid S., Ahmad B. Hybrid porous core low loss dispersion flattened fiber for THz propagation // *Photon. Nanostruct.* – 2016. – Vol. 22. – P. 18–23.
21. Takehito Suzuki, Masashi Sekiya, Hideaki Kitahara. Terahertz beam focusing through designed oblique metal-slit array // *Applied Optics*. – 2019. – Vol. 58, No. 15. – P. 4007–4013.
22. Kock W. E. Metal-lens antennas // *Proc. IRE*. – 1946. – Vol. 34. – P. 828–836.
23. Kock W. E. Metallic Delay Lenses // *Bell System Technical Journal*. – 1948. – Vol. 27. – P. 58–82.
24. Mendis R., Mittleman D. M. Artificial dielectrics // *IEEE Microwave Magazine*. – 2014. – P. 34–42.
25. Minin O. V., Minin I. V. *Diffractional optics of millimeter waves*. – Bristol and Philadelphia : Institute of Physics Publishing, 2004. – 396 p.
26. Yang Q., Gu J., Wang D., Zhang X., Tian Z., Ouyang C., Singh R., Han J., Zhang W. Efficient flat metasurface lens for terahertz imaging // *Opt. Exp.* – 2014. – Vol. 22. – P. 25931–25939.
27. Neu J., Krolla B., Paul O., Reinhard B., Beigang R., Rahm M. Metamaterial-based gradient index lens with strong focusing in the THz frequency range // *Opt. Exp.* – 2010. – Vol. 18. – P. 27748–27757.
28. Suzuki T., Yonamine H., Konno T., Young J. C., Murai K., Miyamaru F., Takano K., Kitahara H., Hangyo M. Analysis and design of concave lens with metallic slit array for terahertz wave band // *Appl. Phys. A*. – 2014. – Vol. 115. – P. 495–500.
29. Mendis R., Nagai M., Wang Y., Karl N., Mittleman D. M. Terahertz Artificial Dielectric Lens // *Scientific Reports*. – 2016. – Vol. 6. – P. 23023. doi: 10.1038/srep23023.
30. Jones S. S. D., Brown J. Metallic Delay Lenses // *Nature*. – 1949. – Vol. 163. – P. 324–325.
31. Brown J. Artificial dielectrics having refractive indices less than unity // *Proc. IEE*. – 1953. – Vol. 100. – P. 51–62.
32. Mendis R., Nag A., Chen F., Mittleman D. M. A tunable universal terahertz filter using artificial dielectrics based on parallel-plate waveguides // *Appl. Phys. Lett.* – 2010. – Vol. 97. – P. 131106. doi: 10.1063/1.3495994.
33. Mendis R., Liu J., Mittleman D. M. Terahertz mirage: deflecting terahertz beams in an inhomogeneous artificial dielectric based on a parallel-plate waveguide // *Appl. Phys. Lett.* – 2012. – Vol. 101. – P. 111108. doi: 10.1063/1.4752241.
34. Torres V. et al. Experimental demonstration of a millimeter-wave metallic ENZ lens based on the energy squeezing principle // *IEEE Trans. Antennas Propag.* – 2015. – Vol. 63. – P. 231–239.
35. Savini G., Ade P. A. R., Zhang J. A new artificial material approach for flat THz frequency lenses // *Opt. Express*. – 2012. – Vol. 20. – P. 25766–25773.
36. Takebayashi Y., Konno T., Shimada S., Miyamaru F., Young J. C., Kitahara H., Takano K., Hangyo M., Suzuki T. Focusing effect measurements of artificial dielectric multilayer lens with metal rectangular chips for terahertz wave band // *Appl. Phys. A*. – 2014. – Vol. 115. – P. 501–508.
37. Hu D., Wang X., Feng S., Ye J., Sun W., Kan Q., Klar P. J., Zhang Y. Ultrathin terahertz planar elements // *Adv. Opt. Mater.* – 2013. – Vol. 1. – P. 186–191.
38. Jiang X.-Y., Ye J.-S., He J.-W., Wang X.-K., Hu D., Feng S.-F., Kan Q., Zhang Y. An ultrathin terahertz lens with axial long focal depth based on metasurfaces // *Opt. Express*. – 2013. – Vol. 21. – P. 30030–30038.
39. Park S.-G., Lee K., Han D., Ahn J., Jeong K.-H. Subwavelength silicon through-hole arrays as an all-dielectric broadband terahertz gradient index metamaterial // *Appl. Phys. Lett.* – 2014. – Vol. 105. – P. 091101.
40. Yang Q., Gu J., Wang D., Zhang X., Tian Z., Ouyang C., Singh R., Han J., Zhang W. Efficient flat metasurface lens for terahertz imaging // *Opt. Express*. – 2014. – Vol. 22. – P. 25931–25939.
41. Togashi T., Kitahara H., Takano K., Hangyo M., Mita M., Young J. C., Suzuki T. Terahertz path-length lens composed of oblique metal slit array // *Appl. Phys. A*. – 2015. – Vol. 118. – P. 397–402.
42. Minin I.V., Minin O. V. Photonics of isolated dielectric particles of arbitrary 3D shape - a new direction of optical information technologies [Electronic resource] // *Vestnik NSU*. – 2014. – Vol. 12. – P. 59–70. – Mode of access: <http://www.nsu.ru/xmlui/handle/nsu/7717>.

43. Minin I. V., Minin O. V. Diffractive optics and nanophotonics: Resolution below the diffraction limit. – Springer, 2016 [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.springer.com/us/book/9783319242514#aboutBook>.

44. Luk'yanchuk B. S., Paniagua-Domínguez R., Minin I., Minin O., Wang Z. Refractive index less than two: photonic nanojets yesterday, today and tomorrow // *Optical Materials Express*. – 2017. – Vol. 7, Issue 6. – P. 1820–1847. doi: 10.1364/OME.7.001820.

45. Heifetz A., Kong S.-C., Sahakian A. V., Taflove A., Backman V. Photonic Nanojets // *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*. – 2009. – Vol. 6. – P. 1979–1992.

46. Минин И. В., Минин О. В. Фотонные струи в науке и технике // *Вестник СГУГиТ*. – 2017. – Т. 22, № 2. – С. 212–234.

47. Pacheco-Pena V., Beruete M., Minin I. V., Minin O. V. Terajets produced by 3D dielectric cuboids // *Appl. Phys. Lett.* – 2014. – Vol. 105. – P. 084102.

48. Pacheco-Pena V., Beruete M., Minin I. V., Minin O. V. Multifrequency focusing and wide angular scanning of terajets // *Optics Letters*. – 2015. – Vol. 40, Issue 2.

Получено 19.11.2021

© И. В. Минин, О. В. Минин, 2021

FOCUSING OF TERAHERTZ RADIATION WITH A MESOSCALE CUBOID LENS MADE OF ARTIFICIAL DIELECTRIC

Igor V. Minin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, D. Sc., Professor, Chief Researcher, Institute for Strategic Development, e-mail: prof.minin@gmail.com

Oleg V. Minin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, D. Sc., Professor, Chief Researcher, Institute for Strategic Development, e-mail: prof.minin@gmail.com

The aim of this work is to study a new dimensionless cuboid lens made of artificial dielectric for the terahertz wavelength range. The research method is mathematical modeling of the process. It is established that a lens made of anisotropic artificial dielectric along the optical axis with a characteristic size of 3λ is able to focus terahertz radiation at the calculated frequency of 0.15 THz into a focal spot with a transverse size equal to the diffraction limit. The focus area is located along the optical axis of the lens. The ability to focus radiation remains in a wide range of effective refractive index, at least from 1.4 to 1.7, while the value of the focal length does not change significantly.

Keywords: a photon jet, mesoscale the particle, Janus particle, artificial dielectric, lens, diffraction limit

REFERENCES

1. Lee, Y.-S. (2009). *Principles of Terahertz Science and Technology* (pp. 159–170). Berlin: Springer.
2. Daryoosh Saeedkia. (Ed.). (2013). *Handbook of terahertz technology for imaging, sensing and communications*. Cambridge: Woodhead Publishing, 688 p.
3. Siegel, P. H. (2002). Terahertz technology. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 50(3), 910–928.
4. De Maagt, P., Bolivar, P. H., & Mann, C. (2005). Terahertz science, engineering and systems – from space to earth applications. *Wiley Encyclopedia of RF and Microwave Engineering* (pp. 5176–5194). K. Chang (ed.). N. Y.: Wiley-Interscience.
5. Wade, C. G., Šibalić, N., de Melo, N. R., Kondo, J. M., Adams, C. S., & Weatherill, K. J. (2017). Real-time near-field terahertz imaging with atomic optical fluorescence. *Nat. Photonics*, 11, 40–43.
6. Reid, C. B., Reese, G., Gibson, A. P., & Wallace, V. P. (2013). Terahertz time-domain spectroscopy of human blood. *Transactions of Terahertz Science and Technology*, 3(4), 363–367.

7. Saviz, M., Spathmann, O., Streckert, J., Hansen, V., Clemens, M., & Faraji-Dana, R. (2013). Theoretical estimation of safety thresholds for terahertz exposure of surface tissues. *Transactions of Terahertz Science and Technology*, 3(5), 635–640.
8. Taylor, Z. D., Singh, R. S., Bennett, D. B., Tewari, P., Kealey, C. P., Bajwa, N., Culjat, M. O., Stojadinovic, A., Lee, H., Hubschman, J. P., Brown, E. R., & Grundfest, W. S. (2011). THz medical imaging: in vivo hydration sensing. *IEEE Transactions of Terahertz Science and Technology*, 1(1), 201–219.
9. Ajito, K., & Ueno, Y. (2011). THz chemical imaging for biological applications. *IEEE Transactions of Terahertz Science and Technology*, 1(1), 293–300.
10. Woodward, R. M., Cole, B. E., Wallace, V. P., Pye, R. J., Arnone, D. D., Linfield, E. H., & Pepper, M. (2002). Terahertz pulse imaging in reflection geometry of skin cancer and skin tissue. *Physics in Medicine and Biology*, 47, 3853–3855.
11. Hirmer, M., Danilov, S. N., Giglberger, S., Putzger, J., Niklas, A., Jager, A., Hiller, K. A., Loffler, S., Schmalz, G., Redlich, B., Schulz, I., Monkman, G., & Ganichev, S. D. (2012). Spectroscopic study of human teeth and blood visible to terahertz frequencies for clinical diagnostics of dental pulp vitality. *International Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, 33, 366–375.
12. Federici, J., & Moeller, L. (2010). Review of terahertz and subterahertz wireless communications. *Journal of Applied Physics*, 107(11), Article ID 111101, 22 p.
13. Song, H.-J., & Nagatsuma, T. (2011). Present and future of terahertz communications. *IEEE Transactions of Terahertz Science and Technology*, 1(1), 256–263.
14. Nagatsuma, T., Horiguchi, S., Minamikata, Y., Yoshimizu, Y., Hisatake, S., Kuwano, S., Yoshimoto, N., Terada, J., & Takahashi, H. (2013). Terahertz wireless communications based on photonics technologies. *Optics Express*, 21(21), 23736–23747.
15. Nagatsuma, T., Ducournau, G., & Renaud, C. C. (2016). Advances in terahertz communications accelerated by photonics. *Nat. Photonics*, 10, 371–379.
16. Yat Hei Lo, & Rainer Leonhardt. (2008). Aspheric lenses for terahertz imaging. *Optic Express*, 16(20), 15991–15998.
17. Dewey, R. J. (1982). Design considerations for millimeter wave lens antennas. *The Radio and Electronic Engineer*, 52, 551–558.
18. Cloutier, G. G., & Bekefi, G. (1957). Scanning characteristics of microwave aplanatic lenses. *IRE Transactions on Antennas and Propagation*, AP-5, 391–396.
19. Nazarov, M. M., Shilov, A. V., Bzheumikhov, K. A., Margushev, Z. C., Sokolov, V. I., Sotsky, A. B., & Shkurinov, A. P. (2018). Eight-capillary cladding THz waveguide with low propagation losses and dispersion. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, 8, 183–191.
20. Ali, S., Ahmed, N., Aljunid, S., & Ahmad, B. (2016). Hybrid porous core low loss dispersion flattened fiber for THz propagation. *Photon. Nanostruct.*, 22, 18–23.
21. Suzuki, T., Sekiya, M. & Kitahara, H. (2019). Terahertz beam focusing through designed oblique metal-slit array. *Applied Optics*, 58(15), 4007–4013.
22. Kock, W. E. (1946). Metal-lens antennas. *Proc. IRE*, 34, 828–836.
23. Kock, W. E. (1948). Metallic Delay Lenses. *Bell System Technical Journal*, 27, 58–82.
24. Mendis, R., & Mittleman, D. M. (2014). Artificial dielectrics. *IEEE Microwave Magazine* (pp. 34–42).
25. Minin, O. V., & Minin, I. V. (2004). *Diffractional optics of millimeter waves*. Bristol and Philadelphia: Institute of Physics Publishing, 396 p.
26. Yang, Q., Gu, J., Wang, D., Zhang, X., Tian, Z., Ouyang, C., Singh, R., Han, J., & Zhang, W. (2014). Efficient flat metasurface lens for terahertz imaging. *Opt. Exp.*, 22, 25931–25939.
27. Neu, J., Krolla, B., Paul, O., Reinhard, B., Beigang, R., & Rahm, M. (2010). Metamaterial-based gradient index lens with strong focusing in the THz frequency range. *Opt. Exp.*, 18, 27748–27757.
28. Suzuki, T., Yonamine, H., Konno, T., Young, J. C., Murai, K., Miyamaru, F., Takano, K., Kitahara, H., & Hangyo, M. (2014). Analysis and design of concave lens with metallic slit array for terahertz wave band. *Appl. Phys. A.*, 115, 495–500.
29. Mendis, R., Nagai, M., Wang, Y., Karl, N., & Mittleman, D. M. (2016). Terahertz Artificial Dielectric Lens. *Scientific Reports*, 6, P. 23023. doi: 10.1038/srep23023.
30. Jones, S. S. D., & Brown, J. (1949). Metallic Delay Lenses. *Nature*, 163, 324–325.
31. Brown, J. (1953). Artificial dielectrics having refractive indices less than unity. *Proc. IEE*, 100, 51–62.

32. Mendis, R., Nag, A., Chen, F., & Mittleman, D. M. (2010). A tunable universal terahertz filter using artificial dielectrics based on parallel-plate waveguides. *Appl. Phys. Lett.*, *97*, P. 131106. doi: 10.1063/1.3495994.
33. Mendis, R., Liu, J., & Mittleman, D. M. (2012). Terahertz mirage: deflecting terahertz beams in an inhomogeneous artificial dielectric based on a parallel-plate waveguide. *Appl. Phys. Lett.*, *101*, P. 111108. doi: 10.1063/1.4752241.
34. Torres, V., & et al. (2015). Experimental demonstration of a millimeter-wave metallic ENZ lens based on the energy squeezing principle. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, *63*, 231–239.
35. Savini, G., Ade, P. A. R., & Zhang, J. (2012). A new artificial material approach for flat THz frequency lenses. *Opt. Express*, *20*, 25766–25773.
36. Takebayashi, Y., Konno, T., Shimada, S., Miyamaru, F., Young, J. C., Kitahara, H., Takano, K., Hangyo, M., & Suzuki, T. (2014). Focusing effect measurements of artificial dielectric multilayer lens with metal rectangular chips for terahertz wave band. *Appl. Phys. A.*, *115*, 501–508.
37. Hu, D., Wang, X., Feng, S., Ye, J., Sun, W., Kan, Q., Klar, P. J., & Zhang, Y. (2013). Ultrathin terahertz planar elements. *Adv. Opt. Mater.*, *1*, 186–191.
38. Jiang, X.-Y., Ye, J.-S., He, J.-W., Wang, X.-K., Hu, D., Feng, S.-F., Kan, Q., Zhang, Y. (2013). An ultrathin terahertz lens with axial long focal depth based on metasurfaces. *Opt. Express*, *21*, 30030–30038.
39. Park, S.-G., Lee, K., Han, D., Ahn, J., & Jeong, K.-H. (2014). Subwavelength silicon through-hole arrays as an all-dielectric broadband terahertz gradient index metamaterial. *Appl. Phys. Lett.*, *105*, P. 091101.
40. Yang, Q., Gu, J., Wang, D., Zhang, X., Tian, Z., Ouyang, C., Singh, R., Han, J., & Zhang, W. (2014). Efficient flat metasurface lens for terahertz imaging. *Opt. Express*, *22*, 25931–25939.
41. Togashi, T., Kitahara, H., Takano, K., Hangyo, M., Mita, M., Young, J. C., & Suzuki, T. (2015). Terahertz path-length lens composed of oblique metal slit array. *Appl. Phys. A.*, *118*, 397–402.
42. Minin, I. V., & Minin, O. V. (2014). Photonics of isolated dielectric particles of arbitrary 3D shape - a new direction of optical information technologies. *Vestnik NSU*, *12*, 59–70. Retrieved from <http://www.nsu.ru/xmlui/handle/nsu/7717>.
43. Minin, I. V., & Minin, O. V. (2016). *Diffraction optics and nanophotonics: Resolution below the diffraction limit*. Springer. Retrieved from <http://www.springer.com/us/book/9783319242514#aboutBook>.
44. Luk'yanchuk, B. S., Paniagua-Domínguez, R., Minin, I., Minin, O., & Wang, Z. (2017). Refractive index less than two: photonic nanojets yesterday, today and tomorrow. *Optical Materials Express*, *7*(6), 1820–1847. Retrieved from <https://doi.org/10.1364/OME.7.001820>.
45. Heifetz, A., Kong, S.-C., Sahakian, A. V., Taflove, A., & Backman, V. (2009). Photonic Nanojets. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, *6*, 1979–1992.
46. Minin, I. V., & Minin, O. V. (2017). Photon jets in science and technology. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, *22*(2), 212–234 [in Russian].
47. Pacheco-Pena, V., Beruete, M., Minin, I. V., & Minin, O. V. (2014). Terajets produced by 3D dielectric cuboids. *Appl. Phys. Lett.*, *105*, P. 084102.
48. Pacheco-Pena, V., Beruete, M., Minin, I. V., & Minin, O. V. (2015). Multifrequency focusing and wide angular scanning of terajets. *Optics Letters*, *40*(2).

Received 19.11.2021

© I. V. Minin, O. V. Minin, 2021