

КВАЗИОПТИЧЕСКАЯ ЛИНЗОВАЯ ЛИНИЯ ПЕРЕДАЧИ С ОПТИЧЕСКИМ КонтРАСТОМ, БЛИЗКИМ К ЕДИНИЦЕ

Олег Владиленович Минин

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры специальных устройств, инноватики и метрологии, тел. (913)396-51-34, e-mail: oleg.minin@ngs.ru

Игорь Владиленович Минин

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры специальных устройств, инноватики и метрологии, тел. (913)396-51-34, e-mail: prof.minin@gmail.com

Рассмотрена квазиоптическая линзовая линия передачи с оптическим контрастом, близким к единице. Такие устройства могут быть использованы при исследовании влияния лазерного излучения на биологические среды, в СВЧ, терагерцовом, оптическом и рентгеновском диапазонах длин волн, а также в акустике. Использование составных преломляющих линз, представляющих собой набор одинаковых сферических линз, расположенных друг за другом на одной оптической оси и с показателем преломления, близким к единице, позволяет уменьшить потери на отражения в такой линзе. Уменьшение фокусного расстояния в таких преломляющих линзах возможно за счет увеличения числа преломляющих поверхностей.

Ключевые слова: квазиоптическая линзовая линия передачи, сферическая линза, составная линза, показатель преломления, близкий к единице.

LENS QUASI-OPTICAL TRANSMISSION LINE WITH OPTICAL CONTRAST CLOSE TO 1

Oleg V. Minin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, D. Sc., Senior Researcher, Professor, Department of Special-Purpose Devices, Innovatics and Metrology, phone: (913)396-51-34, e-mail: oleg.minin@ngs.ru

Igor V. Minin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, D. Sc., Senior Researcher, Professor, Department of Special-Purpose Devices, Innovatics and Metrology, phone: (913)396-51-34, e-mail: prof.minin@gmail.com

The quasi-optical transmission line with optical contrast close to 1 is considered. Such devices can be used to study the effect of laser radiation on biological media, in microwave, terahertz, optical and X-ray wavelength ranges, as well as in acoustics. The use of composite refractive lenses, which are a set of identical spherical lenses arranged one after another on the same optical axis and with a refractive index close to one, reduces the loss of reflection in such a lens. Reducing the focal length in such refractive lenses is possible by increasing the number of refractive surfaces.

Key words: quasi-optical lens transmission line, spherical lens, composite lens, refractive index close to unity.

В общем случае применение лазеров в медицинских исследованиях основано на использовании широкого круга явлений, связанных с разнообразными эффектами взаимодействия света с биологическими объектами [1]. Морфологическое разнообразие биотканей определяет различный характер прохождения света через них. Размеры клеток и структурных элементов клеток и соединительной биоткани лежат в диапазоне от нескольких десятков нанометров до сотен микрометров [1]. Нормальный эритроцит в плазме имеет форму вогнуто-вогнутого диска диаметром от 7,1 до 9,2 мкм, толщиной 0,9–1,2 мкм в центре и 1,7–2,4 мкм на периферии; лейкоциты по форме близки к сфере и имеют широкий разброс по диаметрам, 8–22 мкм; тромбоциты в потоке крови представляют собой двояковыпуклые дискообразные частицы диаметром от 2 до 4 мкм [1].

Обычно биологические среды часто моделируются ансамблем однородных сферических частиц, поскольку многие клетки и микроорганизмы, в частности клетки крови, по форме близки к сферам или эллипсоидам. Для многих биологических тканей и крови относительный показатель преломления близок к единице и равен примерно 1,07 [1]. Особенностью таких сред с малым значением относительного показателя преломления является очень малые потери мощности излучения на отражение на границе материал линзы – окружающая среда.

Лазерное излучение в ИК области хорошо проникает через кожный покров на глубину до 50–70 мм и может достигнуть крови, протекающую в вене, артерии или микроциркуляторном русле и проводить неинвазивное (без прокола кожи) облучение крови.

Известно, что показатель преломления для электромагнитного излучения с энергией E в интервале примерно 10–50 кэВ очень слабо отличается от единицы. Если записать комплексный коэффициент преломления в виде $m = 1 - \delta + i\beta$, то, например, для алюминия и $E = 25$ кэВ имеем $\delta = 8,643 \cdot 10^{-7}$, $\beta = 1,747 \cdot 10^{-9}$. В последнее время стало развиваться новое направление: рентгеновская преломляющая оптика [2–5].

В микроволновом и субмиллиметровом диапазонах длин волн существуют материалы с показателем преломления, близким к единице: пеноматериалы, метаматериалы, композитные материалы, например, пенополистирольный пенопласт ПС-1 при плотности материала 0,1 г/см³ имеет показатель преломления 1,05 [6], композиты на основе фторопласта 4 перекрывают диапазон значений n от 1,05 до 1,40 на длине волны 1–2 мм [7], синтаксической пены [8] с показателем преломления 1,07 и т. д.

В оптическом и терагерцовом диапазонах длин волн показатель преломления N метаматериалов может быть больше единицы, около единицы или меньше единицы [9–14]. Например, для оптического диапазона длин волн создан материал с показателем преломления равным 1,025 [15]. Изготовление таких линз возможно на 3D нанопринтерах [16].

Особенности конструирования акустических линз и линий передачи состоят в учете акустического импеданса (произведение плотности материала ρ на

скорость звука c в нем) среды и материала линзы. Эти величины должны быть близки друг другу. Иначе возрастают потери энергии от границы раздела материал – среда:

$$\rho_1 C_1 \cong \rho_2 C_2. \quad (1)$$

Для линз с малым контрастом показателя преломления скорости звука в материале линзы и окружающей среде должны быть близки, но отличаться друг от друга:

$$C_1 \sim C_2. \quad (2)$$

В простейшем случае падения звуковой волны на границу раздела двух сред задача была решена еще Релеем, давшим как общую формулу, так и ее выражение для частных случаев. При перпендикулярном падении на границу раздела отношение отраженной энергии к падающей определяется, согласно Релею, выражением [17]:

$$R = \left(\frac{\rho_1 C_1 - \rho_2 C_2}{\rho_1 C_1 + \rho_2 C_2} \right)^2, \quad (3)$$

где ρ и C представляют плотности и скорости звука в соответствующих средах. Таким образом, отражательная способность R зависит только от различия акустических плотностей обеих сред.

В качестве материала акустической линзы можно использовать, например, для линзы расположенной в воздухе – угарный газ. Скорость звука в воздухе 331 м/с и в угарном газе 338 м/с. Относительная скорость равна 1,02, при этом относительный импеданс равен всего 1,014. Таким образом, потери на отражения излучения от границы раздела двух сред практически отсутствуют.

Из технической литературы известно, что чем больше температура воздуха, тем с большей скоростью в нем распространяется звук. При увеличении температуры на 1 °С скорость звука увеличивается примерно на 0,5 м/с. Если при 0 °С скорость звука составляет 331,5 м/с, то при обычной комнатной температуре (18 °С) эта скорость равна 342 м/с. Скорость звука в воздухе в зависимости от температуры может быть определена из выражения:

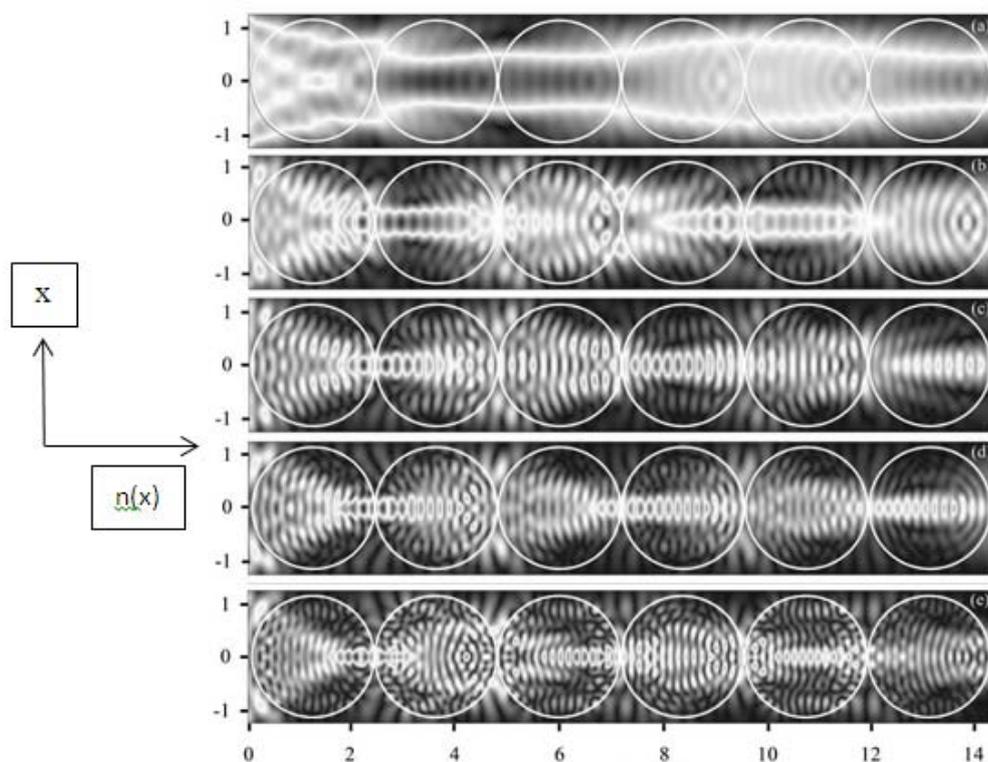
$$C = 20 T^{0,5} [\text{м/с}]. \quad (4)$$

Например, воздушная линза при температуре газа 10 °С имеет скорость звука 337,3 м/с, а при температуре окружающего воздуха 0 °С – 331,5 м/с, (относительная скорость звука 1,018), при этом плотность воздуха при 0 °С равна 1.293 кг/м³, а при 10 °С – 1,247 кг/м³. Таким образом, относительный импеданс равен 1,017.

В качестве материала для акустических линз могут использоваться различные композитные материалы.

В качестве фокусирующего излучение устройств могут использоваться мезоразмерные частицы с различной формой поверхности и формирующие фотонную струю, как в электромагнитном диапазоне длин волн [18–23], так и в акустике [24–28]. Однако в таких устройствах используются материалы с оптическим контрастом, находящимся в пределах 1,3–2.

На рисунке приведен результат моделирования распространения излучения в квазиоптической линзовой линии передачи с оптическим контрастом, близким к единице. Линия передач состоит из шести соосно расположенных в непосредственной близости друг от друга сферических мезоразмерных линз с контрастом показателя преломления, равными соответственно 1,05; 1,3; 1,5; 1,7; 2. Диаметр линз равен 4λ , где λ длина волны излучения.



Результат моделирования распространения излучения в квазиоптической линзовой линии передачи с оптическим контрастом, близким к единице

Такая линия передач, состоящая из соосно расположенных в непосредственной близости друг от друга сферических мезоразмерных линз, количеством не менее 2 может рассматриваться как неоднородная среда. Коэффициент преломления такой среды $n(x)$ уменьшается от оси (x – расстояние до оси). Установлено, что наибольший (на оси) показатель преломления $N(0)$ материала сферической линзы должен быть равен примерно 1,01–1,05. Наименьшими потерями обладает линза с минимальным показателем преломления, при этом про-

пространственное разрешение составляет порядка длины волны используемого излучения. С увеличением показателя преломления возрастают потери и несколько увеличивается пространственное разрешение линзы.

В сферической (шарообразной) линзе радиуса R , показателя преломления N и с фокусным расстоянием от центра линзы равным F [29, 30].

Фокусное расстояние зависит от N , R и приближенно описывается по выражению:

$$F = \frac{NR}{2(N-1)}. \quad (5)$$

При $N > 2$ область фокусировки находится внутри линзы, а при $1 < N < 2$ вне линзы. Фокусное расстояние f для составной линзы с показателем преломления, близким к единице определяется как

$$f = \frac{F}{n}, \quad (4)$$

где F – фокусное расстояние для одной линзы; n – количество сферических линз.

Основой приближения тонких линз является то, что луч, проходящий через линзу, меняет направление, но не положение. Однако, если толщина t (если P – расстояние между линзами, общая толщина $t = np$) линзы становится сопоставимым с f , тогда положение луча меняется.

Использование составных преломляющих линз, представляющих собой набор одинаковых сферических линз, расположенных друг за другом на одной оптической оси и с показателем преломления, близким к единице, позволяет уменьшить потери на отражения в такой линзе. Уменьшение фокусного расстояния в таких преломляющих линзах возможно за счет увеличения числа преломляющих поверхностей. Однако подобный подход имеет одно существенное ограничение: при увеличении числа преломляющих поверхностей возрастает длина (толщина) линзы, которая не должна быть больше ее фокусного расстояния.

Таким образом, составная линза с показателем преломления, близким к единице может состоять из одинаковых линз или линз уменьшающихся в диаметре по направлению распространения излучения и применяться как линия передачи излучения. Особенностью такой линии передач являются минимальные потери излучения на отражение.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тучин В. В. Лазеры и волоконная оптика в биомедицинских исследованиях. – М. : Физматлит, 2010. – 480 с.
2. Патент США. US 1997-01-14 No5594773; Tomie T., X-ray lens.

3. Simons, Hugh, Ahl, Sonja Rosenlund, Poulsen Henning Friis, Detlefs Carsten. Simulating and optimizing compound refractive lens-based X-ray microscopes // *Journal of Synchrotron Radiation* 2017, 24(2), 392-401. DOI: 10.1107/S160057751602049X.
4. B. Lengeler, J. Tümmler, A. Snigirev, I. Snigireva, and C. Raven Transmission and gain of singly and doubly focusing refractive x-ray lenses // *Journal of Applied Physics* 84, 5855 (1998); doi: 10.1063/1.368899.
5. Toshihisa Tomie. The birth of the X-ray refractive lens // *Spectrochimica Acta Part B* 65 (2010) 192–198.
6. Пенопласты / под ред. А. А. Моисеева. – М. : Оборонгиз, 1960. – 184 с.
7. Измерения на миллиметровых и субмиллиметровых волнах / под ред. Р. А. Валитова и Б. И. Макаренко – М. : Сов. радио, 1984. – 296 с.
8. Egidio Rizzi, Enrico Papa, Alberto Corigliano. Mechanical behavior of a syntactic foam: experiments and modeling // *International Journal of Solids and Structures* 37 (2000) 5773-5794.
9. Сухов С. В. Гетерогенная среда с единичным показателем преломления // *Известия Самарского научного центра*. – 2004. – Т. 6. – С. 149–154.
10. Сухов С. В. Нанокompозитный материал с единичным показателем преломления // *Квантовая электроника*. – 2005. – Т. 35, No 8. – С. 741–744.
11. W. Cai, U. Chettiar, A. Kildishev, V. Shalaev. Optical cloaking with metamaterials // *Nature Photonics*. – 2007. – Vol. 7. – P. 224–227.
12. Moiseev S. G. Active maxwell-garnett composite with the unit refractive index // *Physica B: Physics of Condensed Matter*. – 2010. – Vol. 405. – P. 3042–3045.
13. Моисеев С. Г. Оптические свойства композитной среды Максвелла-Гарнета с серебряными включениями несферической формы // *Изв. вузов. Физика*. – 2009. — Т. 52, No 11. – С. 7–12.
14. Sergey G. Moiseev Active Maxwell–Garnett composite with the unit refractive index // *Physica B* 405 (2010) 3042–3045.
15. Xu A. Zhang , Abhijeet Bagal , Erinn C. Dandley , Junjie Zhao , Christopher J. Oldham , Bae-Ian Wu , Gregory N. Parsons , and Chih-Hao Chang. Ordered 3D Thin-Shell Nanolattice Materials with Near-Unity Refractive Indices // *Adv. Funct. Mater.* 2015, 25, 6644–6649.
16. Mona Mirzaeimoghri, Alejandro Morales Martinez, Alireza Panna, Eric E. Bennett, Bertrand M. Lucotte, Don L. DeVoe, Han Wen Nano-printed miniature compound refractive lens for desktop hard x-ray microscopy (2018) // *PLoS ONE* 13(8): e0203319.
17. Е. Гидеман, Кельн Ультразвук // *Успехи физических наук*, Т. XVI, вып. 5, 1936, с. 586–656.
18. Minin I. V., Minin O. V. *Diffraction optics and nanophotonics: Resolution below the diffraction limit*, Springer, 2016, P. 75.
19. Minin I. V., Minin O. V. and Geintz Y. E. Localized EM and photonic jets from non-spherical and non-symmetrical dielectric mesoscale objects: brief review // *Annalen der Physik (AdP)*, May 2015.
20. Boris S. Lukiyanchuk, Ramón Paniagua-Domínguez, Igor V. Minin, Oleg V. Minin and Wang Zengbo. Refractive index less than two: photonic nanojets yesterday, today and tomorrow // *Optical material express*, 7(6), 1820–1847 (2017)
21. Минин О. В., Минин И. В. Акустический аналог феномена фотонной струи // *Вестник СГУГиТ*. – 2016. – Вып. 1 (33). – С. 139–147.
22. Минин О. В., Минин И. В., Харитошин Н. А. Формирование фотонных тераструктур от диэлектрических частиц, не обладающих осевой пространственной симметрией формы // *Вестник СГГА*. – 2014. – Вып. 4 (28). – С. 102–111.
23. Минин О. В., Минин И. В., Харитошин Н. А. Формирование зеркальных фотонных тераструктур // *Вестник СГГА*. – 2014. – Вып. 4 (28). – С. 87–94.
24. Патент РФ 164738. Устройство для фокусировки излучения метакубоидной плоской линзой / Минин И. В., Минин О. В., 2016, 5 с.

25. Патент РФ 167049. Акустическая линза для формирования области фокусировки непосредственно за теневой поверхностью / Минин И. В., Минин О. В., 2016, 6 с.
26. Патент РФ 170911. Акустическая линза / Минин И. В., Минин О. В., 2017, 5 с.
27. Патент РФ 175684. Акустический датчик / Минин И. В., Минин О. В., 2017, 5 с.
28. Патент РФ 172340. Сканирующий акустический микроскоп / Минин И. В., Минин О. В., 2017, 5 с.
29. Зелкин Е. Г., Петрова Р. А. Линзовые антенны. – М. : Сов. радио, 1974. – 280 с.
30. Bernhard Schoenlinner, Xidong Wu, Jim P. Ebling, George V. Eleftheriades, and Gabriel M. Rebeiz, Wide-Scan Spherical-Lens Antennas for Automotive Radars // IEEE Transactions on microwave theory and techniques, V.50, № 9, September 2002, pp. 2166–2175.

© О. В. Минин, И. В. Минин, 2019