

## О ВОЗМОЖНОСТИ ФОКУСИРОВКИ АКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ОБЛАСТЬ МЕНЕЕ ДИФРАКЦИОННОГО ПРЕДЕЛА

### *Олег Владиленович Минин*

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 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. Плеханова, 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

Для достижения острой фокусировки в оптическом диапазоне и в акустике используются линзы из метаматериалов. Недавно предложена инновационная концепция под названием «acoustojet», при которой возможна фокусировка акустической энергии в область с поперечными размерами менее, чем  $\lambda/2$ . В работе показано с помощью численного моделирования и эксперимента, что острая фокусировка возможна в акустике. Для демонстрации был выбран простой цилиндрический объектив подходящих размеров (мезоразмерной частицы в форме цилиндра) и относительная скорость звука между материалом объектива и окружающей среды. При этом может быть сформирована акустическая струя с полушириной (FWHM) менее  $\lambda/2$ . Полученные результаты дают начало новой эре получения акустического изображения со сверхразрешением. Такие устройства необходимы в электронике, материаловедении, медицине, биологической науке и т. д.

**Ключевые слова:** фотонная струя, акустическая струя, острая фокусировка, дифракционный предел, мезоразмерная частица.

## THE POSSIBILITY OF FOCUSING THE ACOUSTIC RADIATION INTO A REGION LESS THAN THE DIFFRACTION LIMIT

### *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

Metamaterial lenses are used to achieve sharp focus in the optical range and in acoustics. Recently, an innovative concept called "acoustojet" was proposed, in which it is possible to focus the acoustic energy in an area with transverse dimensions less than  $\lambda/2$ . By numerical simulation and the experiment it is shown that sharp focusing is possible in acoustics. It is demonstrated by choosing the appropriate size of a simple cylindrical lens (a mesoscale particle in the shape of a cylinder)

and relative speed of sound between the lens material and the environment. In this case, an acoustic jet with a half-width (FWHM) less than  $\lambda/2$  can be formed. The results give rise to a new era of obtaining an acoustic image with superresolution. Such devices are necessary in electronics, materials science, medicine, biological science, etc.

**Key words:** photon jet, acoustic jet, sharp focusing, diffraction limit, dimensionless particle.

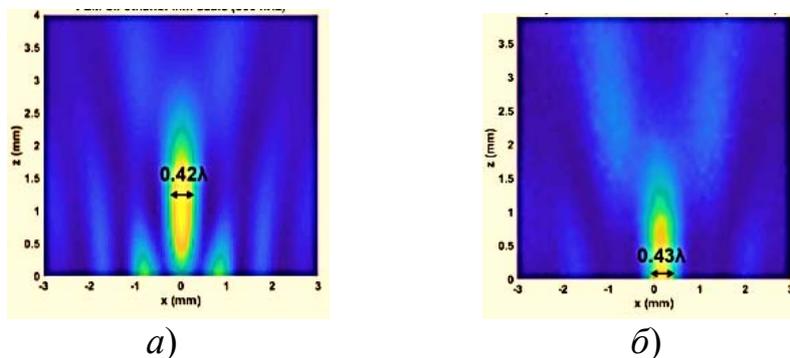
Фундаментальным пределом в волновой физике для фокусировки энергии является дифракционный предел. Как в оптике, так и в акустике критерий Рэлея [2] устанавливает предел поперечного разрешения в дальнем поле равного  $\lambda/2$ . Преодолеть этот предел возможно с помощью специальных линз из метаматериалов [3–7]. Экспериментально было показано, что можно достичь разрешение равное  $\lambda/2$  [8–10].

Идея этого исследования возникла из наших исследований фотонных струй [11–20]. При исследовании фотонной струи было установлено, что окружающая среда должна иметь меньший показатель преломления, чем мезоразмерная частица:

$$n_{\text{частицы}} \approx 1,7n_{\text{среды}}, \quad (1)$$

где  $n$  – показатель преломления.

На рисунке показано распределение акустического поля, сформированные цилиндрической мезоразмерной частицей на частоте 800 кГц.



Акустические поля, сформированные цилиндрической мезоразмерной частицей на частоте 800 кГц: результат численного моделирования (а) и эксперимент (б)

Численное моделирование производилось на программном продукте COMSOL (версия 5.2). Размер сетки геометрии был уточнен для ожидаемого разрешения менее  $\lambda/2$  и выбран равным  $\lambda/20$ . В качестве окружающей среды рассматривались вода, оливковое масло Олива масло и этиловый спирт. Выбор материала линз и окружающей среды был основан на их практической пригодности (токсичность, реактивность, биосовместимость) и их скорость звука. Цилиндрическая мезоразмерная жидкостная частица была помещена в полиэтиле-

новую тонкую оболочку и заполнялась материалами обеспечивающими относительную скорость звука от 1,6 до 2,1. Внешний диаметр цилиндрической частицы равен 300 мкм при толщине оболочки 1 мкм частица облучалась волной с плоским фронтом. В качестве зонда использовался гидрофон с диаметром иглы 200 мкм. Акустическое поле сканировалось в поперечном направлении относительно направления распространения волны с шагом 100 мкм и вдоль с шагом 50 мкм.

Было установлено, что формируемая акустическая струя имеет поперечные размеры менее дифракционного предела.

В работе предложен новый инновационный тип фокусирующих устройств в акустике, обеспечивающих острую фокусировку. Этот факт открывает новые области возможного применения фокусирующих устройств с высоким разрешением, для модификации научных и промышленных приборов, сканирующих акустических микроскопов, различных датчиков и т. д.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Патент РФ 172340. Сканирующий акустический микроскоп / Минин И. В., Минин О. В., 2017, 5 с.
2. Rayleigh, L. R. XXXI. Investigations in optics, with special reference to the spectroscope. London, Edinburgh, Dublin // *Philos. Mag. J. Sci.* 8, 261–274 (1879).
3. Maznev, A. A. & Wright, O. B. Upholding the diffraction limit in the focusing of light and sound // *Wave Motion* 68, 182–189 (2017).
4. Lu, D. & Liu, Z. Hyperlenses and metalenses for far-field super-resolution imaging // *Nat. Commun.* 3, 1205 (2012).
5. Li, J., Fok, L., Yin, X., Bartal, G. & Zhang, X. Experimental demonstration of an acoustic magnifying hyperlens // *Nat. Mater.* 8, 931–934 (2009).
6. Zhang, S., Yin, L. & Fang, N. Focusing Ultrasound with an Acoustic Metamaterial Network // *Phys. Rev. Lett.* 102, 194301 (2009).
7. Minin, O. V. & Minin, I. V. Acoustojet: acoustic analogue of photonic jet phenomenon based on penetrable 3D particle // *Opt. Quantum Electron.* 49, 54 (2017).
8. Zhu, J. et al. A holey-structured metamaterial for acoustic deep-subwavelength imaging // *Nat. Phys.* 7, 52–55 (2011).
9. Kaina, N., Lemoult, F., Fink, M. & Lerosey, G. Negative refractive index and acoustic superlens from multiple scattering in single negative metamaterials // *Nature* 525, 77–81 (2015).
10. Park, J. J., Park, C. M., Lee, K. J. B. & Lee, S. H. Acoustic superlens using membrane-based metamaterials // *Appl. Phys. Lett.* 106, 051901 (2015).
11. Ma, G. et al. Towards anti-causal Green's function for three-dimensional sub-diffraction focusing // *Nat. Phys.* 14, 608–612 (2018).
12. Lopes, J. H. et al. Focusing Acoustic Beams with a Ball-Shaped Lens beyond the Diffraction Limit // *Phys. Rev. Appl.* 8, 024013 (2017).
13. Lopes, J. H., Andrade, M. A. B., Adamowski, J. C., Leao-Neto, J. P. & Silva, G. T. Focusing beyond the diffraction limit with acoustic jets. in 2017 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS) 1–4 (IEEE), <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.2017.8092745> (2017)
14. Minin, I. & Minin, O. Mesoscale Acoustical Cylindrical Superlens. MATEC Web Conf. 155, 01029 (2018).
15. Kassamakov, I. et al. 3D Super-Resolution Optical Profiling Using Microsphere Enhanced Mirau Interferometry // *Sci. Rep.* 7, 3683 (2017).

16. Chen, Z., Taflove, A. & Backman, V. Photonic nanojet enhancement of backscattering of light by nanoparticles: a potential novel visible-light ultramicroscopy technique // *Opt. Express* 12, 1214 (2004).
17. Minin I. V., Minin O. V. *Diffractive optics and nanophotonics: Resolution below the diffraction limit*, Springer, 2016, P. 75.
18. 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.
19. 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)
20. Минин О. В., Минин И. В. Акустический аналог феномена фотонной струи // *Вестник СГУГиТ*. – 2016. – Вып. 1 (33). – С. 139–147.

© О. В. Минин, И. В. Минин, 2019