

ОПТИКА, ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И КОМПЛЕКСЫ

УДК 534

СВЕРХРАЗРЕШЕНИЕ В АКУСТИЧЕСКИХ ФОКУСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВАХ

Олег Владиленович Минин

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор кафедры специальных устройств, инноватики и метрологии, тел. (383)361-07-31, e-mail: prof.minin@gmail.com

Игорь Владиленович Минин

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор кафедры специальных устройств, инноватики и метрологии, тел. (383)361-07-31, e-mail: prof.minin@gmail.com

В статье рассмотрен актуальный вопрос о повышении в акустических системах пространственного разрешения сверхдифракционного предела. Произведено сравнение электромагнитных и акустических (упругих) волн. Предложены простые фокусирующие акустические устройства, формирующие «фотонные» струи в акустике (акустоструя). Определены их основные параметры. Экспериментально показана возможность формирования акустоструи от кубической частицы, выполненной из пластика АБС. Приведены примеры использования таких устройств. Впервые осуществлена фокусировка звуковой волны со сверхразрешением.

Ключевые слова: акустическая линза, фотонная струя, акустоструя, дифракционный предел, фокусировка акустических волн, пространственное разрешение.

Введение

Оптический и акустический каналы являются основными источниками информации, с помощью которых человек получает сведения об окружающем его мире. Сравнивая эти два канала, обычно обращают внимание на их различия: разная разрешающая способность, информационная емкость и т. п. [1–3].

В определенном диапазоне звуковых частот существует соответствие между произведением длины световой волны $\lambda_{\text{св}}$ на скорость света в вакууме c и произведением длины звуковой волны $\lambda_{\text{зв}}$ на скорость звука v , а именно:

$$c\lambda_{\text{св}} \approx V\lambda_{\text{зв}}.$$

Это дает возможность сопоставить длины волн света и звука, воспринимаемые человеком. Видимому диапазону света (0,4–0,8 мкм) соответствует диапазон

слышимых звуков (456–913 Гц) [2]. С использованием этой связи между звуковыми и световыми волнами (или сверхвысокочастотными электромагнитными волнами) возможно моделирование акустических фокусирующих устройств в видимом или сверхвысокочастотном диапазонах длин волн и наоборот.

Принципиальным отличием между акустическими (упругими) и электромагнитными волнами является отличие скорости их распространения, при этом величина этого отличия может составлять 5 и более порядков.

В отличие от электромагнитных волн, в упругой среде могут распространяться как продольные волны, при которых смещения частиц среды осуществляются в направлении распространения акустической волны, так и поперечные волны, у которых смещения частиц перпендикулярны распространению акустической волны [4]. В жидкости и (или) газе, в отличие от твердых тел, нет сил сопротивления сдвигу, поэтому могут распространяться только продольные волны.

Существование поверхностных волн является следствием взаимодействия продольных и поперечных акустических волн при отражении этих волн от плоской границы между различными средами при определенных граничных условиях для компонент смещения [4]. Поверхностные волны [4] подразделяются:

- 1) на волны Рэлея, распространяющиеся вдоль границы твердого тела с вакуумом или достаточно разреженной газовой средой. Энергия этих волн локализована в поверхностном слое толщиной от λ до 2λ , где λ – длина волны [4, 5];

- 2) незатухающие волны с вертикальной поляризацией, распространяющиеся по границе жидкости и твердого тела со скоростью, меньшей, чем скорости продольной и поперечной волн в твердом теле [6];

- 3) волны Р. Стонли, описанные в 1924 г., распространяющиеся вдоль плоской границы двух твердых тел, модули упругости и плотности которых не сильно различаются. Такая волна состоит как бы из двух рэлеевских волн – по одной в каждой среде [7].

Процесс фокусирования акустических волн сходен с процессом фокусирования оптического или электромагнитного излучения [8].

Эффекты фокусировки звуковых волн при отражении от вогнутых поверхностей, например, изогнутые крыши и потолки, парусиновые паруса, были описаны еще в XVII в.

Афанасий Кирхер описал устройство для фокусировки звука – акустический рупор – еще в 1673 г. [9, 10], рис. 1.

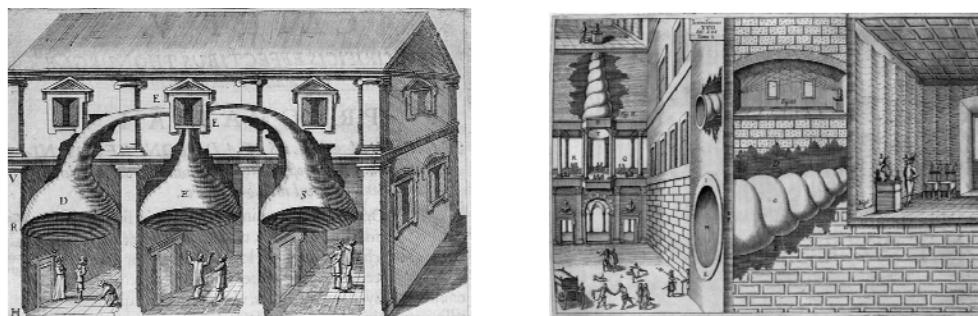


Рис. 1. Акустические рупоры, 1673 г.

Первые опыты над преломлением звука были сделаны К. Зондгаусом в 1852 г. Если устроить из упругих перепонок (пузыря, коллоидия или резины), прикрепленных к обручу, двояковыпуклую чечевицу (линзу) и наполнить ее углекислым газом, то она будет собирать звук (например, от карманных часов) в одну точку (фокус), подобно тому, как стеклянная линза собирает световые лучи [11].

В работах английского физика Джона Тиндаля [8] описана звуковая линза, представляющая собой тонкий воздушный шар с некоторым газом, более тяжелым, чем воздух, например, углекислым газом, рис. 2.

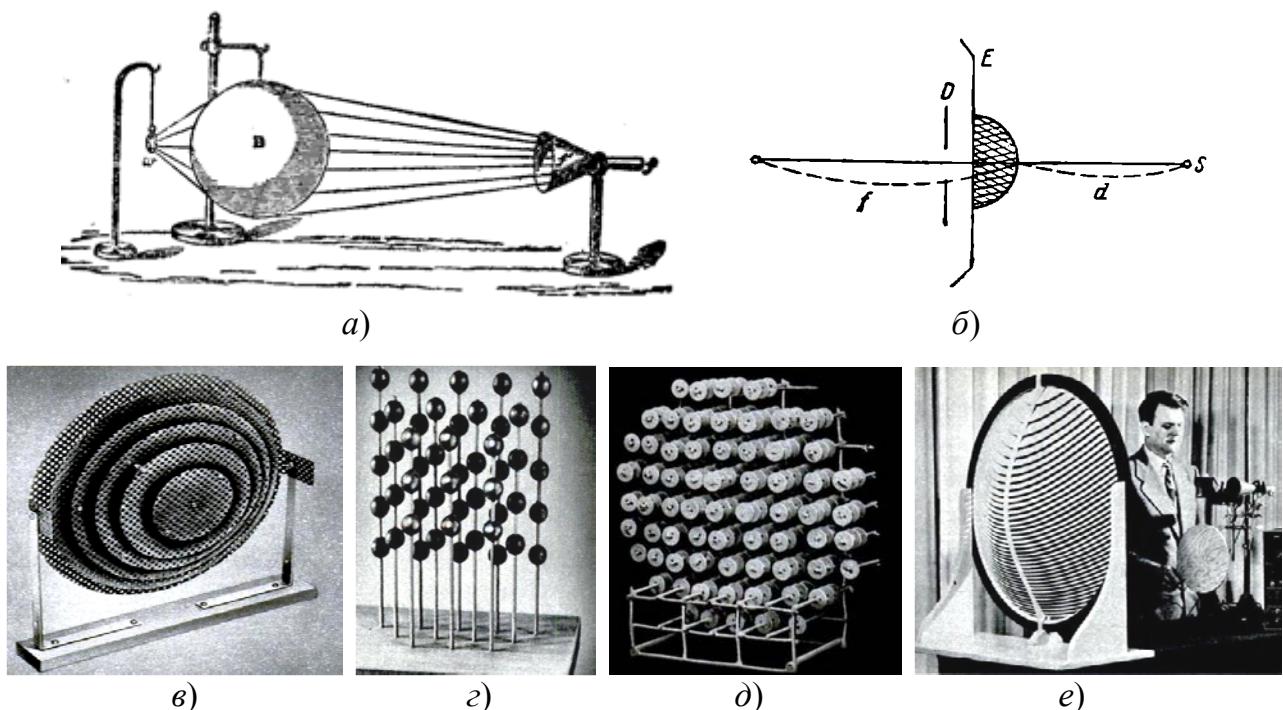


Рис. 2. Примеры акустических линз:

- a)* газовая звуковая линза, 1867 г. [8]; *б)* акустическая линза Н. А. Гезехуса, 1889 г. [12]; *в)* акустическая металинза, состоящая из перфорированных металлических пластин; *г)* линза из металлических сфер; *д)* линза из металлических дисков [20–22]; *е)* У. Кок [25] демонстрирует микроволновую линзу, одновременно работающую и в акустике

Первая обстоятельная качественная работа по звуковой линзе была сделана и доложена (вместе с демонстрацией линзы) на заседании Русского физического общества в 1889 г. физиком Н. А. Гезехусом [12]. Н. А. Гезехус построил акустическую линзу для вычисления коэффициента преломления звука (рис. 2, *б*). Полушаровая тонкая железная сетка наполнялась пухом или легкими каучуковыми стружками и вставлялась в отверстие картонного экрана *E*, перед которым находилась диафрагма *D*. В *S* помещался источник, а за линзой – приемник звука. На рис. 2, *б*: *d* – расстояние от источника звука *S* до акустической линзы; *f* – фокусное расстояние. Так как в рыхлой среде скорость звука меньше,

т. е. она акустически плотнее, получалась собирающая линза, за которой улавливался фокус звуковых волн. Источником звука служил птичий манок, индикатором – чувствительное пламя.

Идея создания линз из искусственной неоднородной среды принадлежит видному русскому физику конца XIX – начала XX вв. – Н. А. Гезехусу [13]. Дальнейший вклад в разработку теории и экспериментальное изучение искусственных преломляющих сред был сделан Н. П. Кацериным. Его работа – «О распространении волн в неоднородной среде» [14], предварительное сообщение о которой было опубликовано в 1898 г. [15]. В работе Н. П. Кацерина рассматриваются три варианта неоднородных сред: слоистая среда, среда, составленная из неподвижных шаров, и неоднородная среда, составленная из неподвижных резонаторов.

Жидкостные акустические линзы были рассмотрены в работах [16, 17]. Первая ультразвуковая линза из алюминия, по-видимому, была экспериментально исследована в работе [18, 19].

В акустическом и микроволновом диапазонах возможно использовать новые искусственные метаматериалы [3, 20–22]. На рис. 2 квазиоптическая акустическая линза, состоящая из перфорированных металлических пластин. В качестве таких метаматериалов могут использоваться упорядоченно расположенные системы сфер и дисков (см. рис. 2). В оптическом диапазоне применяются аналогичные фотонные кристаллические линзы [20–22].

Линза акустическая – это устройство для фокусировки звука путем изменения длины пути, проходимого акустической волной, и ее преломления (рефракции) на граничных поверхностях. Свойства линзы определяются свойствами материала линзы и окружающей ее среды и формой преломляющих поверхностей линзы. Показатель преломления линзы $n = c_1/c_2$, где c_2 и c_1 – скорости волн в материале линзы и в окружающей среде соответственно [23]. Материал для линзы должен обладать минимальным затуханием и волновым сопротивлением, близким к волновому сопротивлению окружающей среды. Линзы изготавливают из твердых материалов, жидкостей и газов. Для фокусировки акустического излучения могут использоваться зонные пластиинки [3, 24–26].

Существенный недостаток таких фокусирующих систем на основе акустических линз состоит в том, что в фокусирующей линзе поглощается до 40 % излучаемой акустической энергии. Кроме того, из-за различия в акустическом импедансе линзы и среды распространения часть энергии волны отражается от границ раздела и не фокусируется должным образом. Перегрев линз и, как следствие, их повреждение особенно сильно сказываются при высоких частотах и больших интенсивностях ультразвука.

В качестве материала для звуковых линз используют твердые тела: пластмассы, металлы, керамику и бетон. В процессе изготовления звуковых линз выявились некоторые неожиданности, связанные с применением ультразвуковых колебаний, начиная с 2–3 МГц и выше. Сказывается поглощение ультразвуковых волн в материале (особенно в пластмассах). Ультразвуковая техника реко-

мендует производить в этом случае «просветление» звуковых линз, что аналогично просветлению оптических линз и производится путем нанесения на поверхность объектива очень тонких переходных слоев. Это осуществляется покрытием поверхности, например, алюминиевой линзы, тонким слоем плексигласа или бакелита. В результате «просветленная» звуковая линза пропускает 90 % энергии падающих на нее звуковых лучей даже на самых высоких частотах [27].

Фокусирование акустических волн твердыми зеркалами осложняется частичным преобразованием продольных волн в поперечные волны, вследствие чего возникают два фокуса на оптической оси [28].

Лорд Рэлей описал акустические линзы в 1879 г. [29]. Краткий обзор звуковых фокусирующих систем приведен в монографии [30].

Первое в мире экспериментальное исследование тонкой структуры дифракционного звукового пятна было выполнено К. А. Леонтьевым (1925 г.) с объективным приемником – электромагнитным телефоном небольших размеров, работавшим на галеновом детекторе. Им изучено распределение звукового давления в фокальном пятне параболического зеркала, причем обнаружены первый и второй максимумы звукового пятна [31]. При исследовании твердых плоскосферических и плоскоэллиптических акустических линз из мрамора и плексигласа, расположенных в жидкости, было установлено, что распределение звукового давления в фокусе описывается функцией Эйри и пространственное разрешение не превышает дифракционного предела [32].

Еще в 1873 г. немецкий физик-оптик Эрнст Аббэ установил, что разрешение оптического микроскопа («дифракционный предел») определяется, как $d = \lambda / (2n \sin a)$, где λ – длина волны света; n – показатель преломления среды; λ – угловая апертура объектива. Эта знаменитая формула даже высечена на памятнике Аббэ, установленном около Йенского университета.

Методы расчета акустических линз

При исследовании полей в акустических фокусирующих устройствах применяется математический аппарат, развитый в трудах О. Ж. Френеля, Й. Франгофера, Г. Р. Кирхгофа, Дж. Грина, Дж. У. Рэлея, П. Дебая, А. Зоммерфельда, анализ которых представлен в работах [28, 30, 33].

Рассмотрим в качестве примера рассеяние акустической волны на волны на проницаемой сферической частице [34]. Проблема рассеяния на однородной ограниченной области, помещенной внутри другой однородной области, в скалярном приближении может быть решена на основе уравнения Гельмгольца:

$$\left(\nabla^2 + k^2 \right) u(x) = 0. \quad (1)$$

При этом давление p и скорость u связаны соотношением

$$p(x, t) = R \{ u(x) e^{i\omega t} \}.$$

Здесь волновое число $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c}$.

Алгоритм решения уравнения (1) и особенности формирования акустоструи от сферических частиц рассмотрены в работе [35].

Акустические фокусирующие устройства

Относительно недавно (в 2004 г.) впервые было обращено внимание на наличие эффекта «фотонной наноструи» при исследовании рассеяния лазерного излучения на прозрачных кварцевых микроцилиндрах, а позднее – на сферических частицах [36]. Фотонная струя возникает в области теневой поверхности диэлектрических микросферических частиц – в так называемой ближней зоне дифракции – и характеризуется сильной пространственной локализацией и высокой интенсивностью оптического поля в области фокусировки. Было показано, что при падении плоской волны на сфероидальную частицу достижимо пространственное разрешение до трети длины волны, что ниже классического дифракционного предела. Обзор современного состояния по формированию фотонной струи диэлектрическими частицами произвольной формы в электромагнитном спектре приведен в работах [37–40].

В то же время, в акустике и ультразвуке также остро стоит вопрос о возможности субволновой фокусировки акустического поля. В работе [35] была рассмотрена задача фокусировки плоской акустической волны сферической полостью (линзой), заполненной различным газом. Параметр Ми сферической частицы составлял $\frac{2\pi a}{\lambda} = (17,5 \dots 27,5)$. Было отмечено, что при небольших параметрах Ми положение фокуса вблизи теневой поверхности сферической линзы не соответствует фокусному расстоянию, предсказанному по теории геометрической оптики.

В линейном режиме следует ожидать, что методы субволновой фокусировки на основе эффекта фотонной струи могут быть успешно применены и в акустическом диапазоне, что и было продемонстрировано в статье [34].

В качестве практического примера на рис. 3, *a* показано формирование акустической «фотонной струи» для сферической частицы (радиус 4 длин волн) из АБС-пластика, расположенной в воде. Отчетливо видно формирование локализованной субволновой зоны акустического поля в условиях значительного отражения, вызванного большим значением плотности материала сферы, по сравнению со средой. Максимальная интенсивность в акустической струе более чем в 155 раз превышает интенсивность падающего поля.

В случае резонансного рассеяния акустической волны на такой же сферической частице (рис. 3, *б*) отчетливо видны моды шепчущей галереи по поверхности частицы, а интенсивность поля в «горячих» точках достигает 3 000.

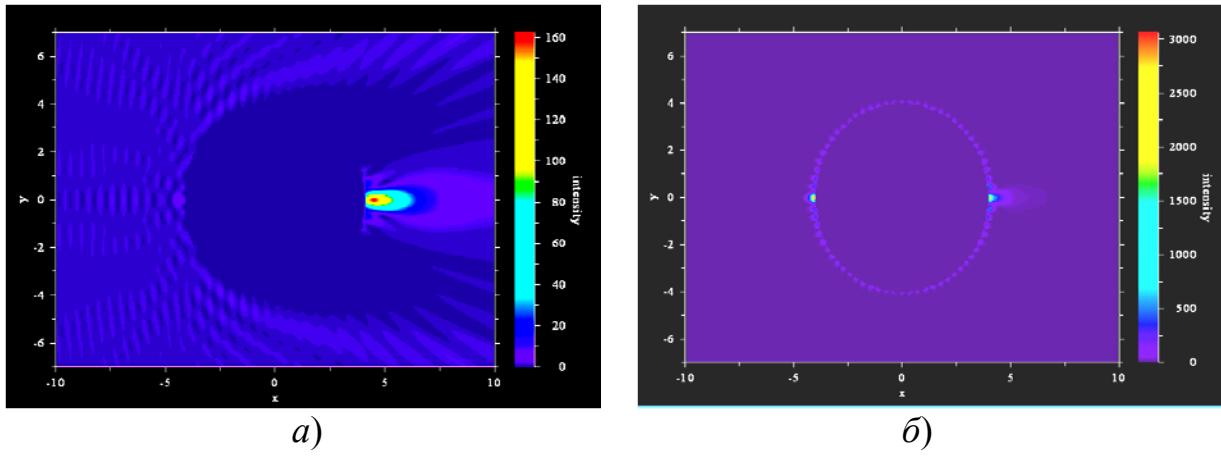


Рис. 3. Формирование акустической «фотонной струи» от сферической частицы из пластика АБС, размещенной в воде:

a) нерезонансный случай; *б)* резонанс

Есть основания полагать, что обнаруженный эффект будет справедлив и для частиц произвольной трехмерной формы [41], в том числе и в режиме «на отражение» [42].

Субволновая фокусировка в акустике

Эффект субволновой акустической струи может найти применение в таких областях, как уникальные приборы для изучения микроструктуры и неразрушающего контроля на основе акустических микроскопов, с помощью которых можно исследовать микроструктуру практически любых оптически непрозрачных объектов: в акустических ловушках микрочастиц, биологических сенсорах, системах неразрушающего контроля, системах акустического видения и т. п.

На основе мезоразмерных звукопроводящих частиц могут быть созданы акустические линзы. Например, если акустическая линза, содержащая оболочку из податливого материала, заполненную жидкостью, или оболочку, заполненную газом, выполнена в форме кубика с размером ребра не менее $\lambda/2$ или в виде сферы с диаметром не менее λ , где λ – длина волны излучения в окружающем пространстве линзы, а заполняемое вещество оболочку имеет скорость звука относительно скорости звука в окружающей среде лежащего в диапазоне от 0,5 до 0,83, то осуществляется фокусировка акустического излучения.

На рис. 4 приведен пример фокусировки звуковых волн такой линзой.

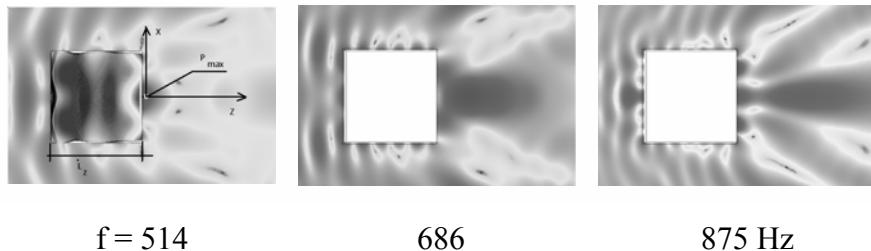


Рис. 4. Фокусировка звуковых волн акустической мезоразмерной кубоидной линзой (моделирование выполнено доктором Rubén Picó Vila из Universitat Politècnica de València)

Если акустическую линзу с плоскопараллельными гранями, перпендикулярными ее оптической оси, и с радиальным градиентом акустического коэффициента преломления, выполнить в виде кубоида с величиной ребра, равного $(0,9\text{--}1,2)\lambda N$, где $N = 1, 2, \dots, \lambda$ – длина упругой волны, величина относительного акустического коэффициента преломления изменяется от $1,2n_{\text{ср}}$ до $1,6n_{\text{ср}}$, где $n_{\text{ср}}$ – акустический коэффициент преломления окружающей среды линзы, а по оптической оси линзы выполнить звукопроницаемый канал постоянного сечения с характерным поперечным размером не более $0,25\lambda$, заполненным материалом с акустическим коэффициентом преломления, равным $n_{\text{ср}}$ [43], то можно достичь пространственного разрешения порядка характерного размера отверстия в линзе.

Были проведены предварительные экспериментальные исследования возможности фокусировки с помощью кубической частицы, помещенной в воду. В качестве материала частицы, изготовленной по технологии 3D-принтера, был выбран пластик АБС (черный), измерения были проведены на частоте 1 МГц. Схема эксперимента представлена на рис. 5.

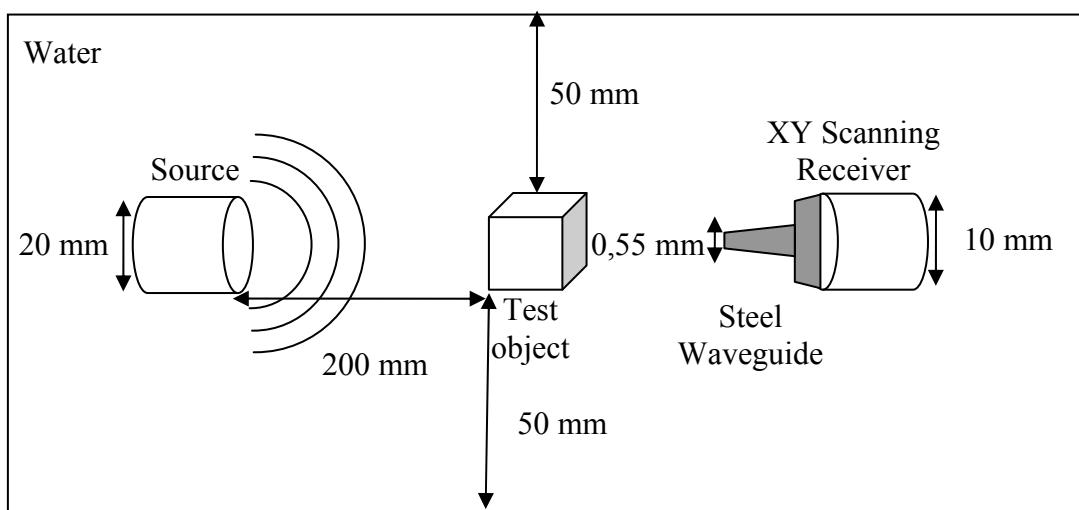


Рис. 5. Схема эксперимента по фокусировке кубоидной частицей в воде

Предварительные результаты экспериментов подтверждают возможности локализации акустического поля в теневой стороне кубической частицы с разрешением не хуже половины длины волны.

Акустическая микроскопия есть совокупность способов визуализации микроструктуры и формы малых объектов с помощью ультразвуковых и гиперзвуковых волн. Существенно увеличить пространственное разрешение в сканирующем акустическом микроскопе возможно, если в области фокусировки акустической линзы установить мезоразмерную частицу с характерным размером не более поперечного размера области фокусировки и не менее $\lambda/2$, где λ – длина волны используемого излучения в среде, со скоростью звука в материале частицы относительно скорости звука в окружающей среде, лежащего в диапазоне от 0,5 до 0,83. В этом случае, пространственное разрешение превышает пространственное разрешение акустической линзы в 3–3,5 раза, что эквивалентно повышению частоты ультразвукового излучения в 3–3,5 раза.

Акустические датчики широко используются для различных систем акустического видения, в устройствах акустической навигации и связи, для неразрушающего контроля, в медицине, при этом в качестве чувствительных элементов для регистрации акустического излучения используются устройства, работающие на различных физических принципах: пьезорезистивный, пьезоэлектрический. Однако чувствительность этих датчиков ограничивается минимальным регистрируемым давлением.

Для повышения величины давления на чувствительном элементе приемника осуществляют фокусировку акустического излучения на нем с помощью акустических линз. Существенно повысить величину давления на чувствительном элементе акустического приемника возможно, если акустическую линзу выполнить в виде звукопроводящей частицы, формирующей «фотонную» струю. При этом звукопроводящая частица может быть выполнена в форме сферы, кубика, усеченной сферы, кругового конуса и т. д.

На основе акустических устройств, обеспечивающих субволновую фокусировку излучения, может быть создана акустическая ловушка в поле стоячей волны на основе двух встречных пучков, состоящая из последовательно расположенных источника ультразвукового излучения, первого устройства формирования области фокусировки, рабочей камеры для размещения в ней текучей среды содержащей частицы, второго устройства формирования области фокусировки, расположенного навстречу первому устройству формирования области фокусировки, и второго источника излучения.

Рассматриваемые акустические фокусирующие элементы могут найти применение в акустических ловушках для захвата, разделения, концентрирования и манипулирования микрочастицами, в современной биологии и биофизике, медицине и биоинженерии, например, для выстраивания микрооптомеханических систем, сортировки биологических клеток, в химии, электронике, нанотехнологии и т. д.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Грегуш П. Звуковидение. – М. : Мир, 1982. – 232 с.
2. Бедницкий А., Ковалев А. О связи длин волн видимого света и слышимого звука // Фотоника. – 2008. – № 4. – С. 38–39.
3. Minin I. V., Minin O. V. diffractive optics of millimetre waves. – London: IOP Publisher, 2004. – 396 p.
4. Викторов И. А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах. – М. : Наука, 1981. – 287 с.
5. Lord Rayleigh. On Waves Propagated along the Plane Surface of an Elastic Solid // Proc. London Math. Soc. – 1885. – S1–17 (1). – P. 4–11.
6. Физическая энциклопедия / Под ред. А. М. Прохорова. – М. : Большая Российская энциклопедия, 1994. – Т. 3. – С. 649–650.
7. Молотков И. А. Возбуждение волн Рэлея и Стонли // Зап. науч. сем. ЛОМИ «Математические вопросы теории распространения волн». – Наука, 1970. – С. 168–183.
8. John Tyndall. Sound. – London: LONGMANS, GREEN, and CO., 1867. – 350 p.
9. Kircher A. Phonurgia nova sive conjugium mechanico-physicum artis & naturae paronympha phonosophia concinnatum. Kempten. R. Dreher. – Germany, 1673. – 229 p.
10. Lamberto Tronchin. The 'Phonurgia Nova' of Athanasius Kircher: The Marvellous sound world of 17th century // Proc. Mtgs. Acoust. – 2008. – Vol. 4. – P. 015002. DOI: 10.1121/1.2992053.
11. Carl Sondhauss. Uener die Refraction des Schalles // Ann. Physik Chemie. – 1852. – Vol. 85. – P. 378–384.
12. Якобсон И. И. Русский физик Н. Ф. Гезехус // Природа. – 1949. – № 7. – Вып. 38. – С. 70–76.
13. Кудрявцев С. П. История физики. – М. : Государственное учебно-педагогическое издательство министерства просвещения РСФСР, 1956. – Т. 2. – 487 с.
14. Кацерин Н. П. О распространении волн в неоднородной среде // Ученые записки императорского Московского университета, Отдел физико-математический. – 1904. – Вып. 20.
15. Кацерин Н. П. О распространении волн в неоднородной среде // Журнал Русского физико-химического общества. – 1898. – 30. – С. 61.
16. Минин И. В., Минин О. В. Дифракционная квазиоптика и ее применения. – Новосибирск : СибАгс, 1999. – 308 с.
17. Giacomini. Alcuni Esperimenti di Ottica degli Ultrasuoni // Alta Frequenza. – 1938. – P. 660–674.
18. Pohlman R. Uber die Moglichkeit einer akustischen Abbildung in Analogie zur Optischen // Zeits. f. Physik. – 1938. – 113. – P. 697.
19. W. Bez-Bardilli, Ober ein Ultraschall. Total reflectometer zur Messung von Schallgeschwindigkeiten sowie der elastischen Konstanten fester Korper // Zeits. f. Physik. – 1935. – 96. – P. 761.
20. Minin I. V., Minin O. V., Triandaphilov Y. R., Kotlyar V. V. Subwavelength diffractive photonic crystal lens // Progress In Electromagnetics Research B (PIER B). – 2008. – P. 257–264.
21. Minin I. V., Minin O. V., Triandaphilov Y. R., Kotlyar V. V. Focusing Properties of Two Types of Diffractive Photonic Crystal Lens // Optical Memory & Neural Networks (Information Optics). – 2008. – Vol. 17, No. 3. – P. 244–248.
22. Минин И. В., Минин О. В. Квазиоптика: современные тенденции развития. – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. – 163 с.
23. Физический энциклопедический словарь / Под ред. А. М. Прохорова. – М. : Советская энциклопедия, 1983. – 586 с.

24. Кирилов В. А., Твердохлебов В. И., Хоменко В. И. Демонстрационный опыт с акустической зонной пластинкой // УФН. – 1964. – Т. 70, вып. 1. – С. 166.
25. Кок У. Звуковые и световые волны. – М. : Мир, 1966. – 160 с.
26. Ultrasound imaging. Medical applications / Ed. I. V. Minin and O. V. Minin. – Austria: INTECH, 2010. – 330 р.
27. Ощепков П. К., Пирожников Л. Б. Звуковидение. – М.: Знание, 1984. – 64 с.
28. Каневский И. Н. Фокусирование звуковых и ультразвуковых волн. – М. : Наука, 1977. – 336 с.
29. Rayleigh J. W. S. The Theory of Sound. Vol. 1, 2. – New York : Dover Publications, 1945.
30. Розенберг Л. Д. Звуковые фокусирующие системы. – М.–Л. : Издательство Академии наук СССР, 1949. – 112 с.
31. Леонтьев К. А. Экспериментальное исследование дифракции звука // Журнал Русского физико-химического общества. – 1925. – С. 49.
32. Тартаковский Б. Д. Дифракционная структура изображения точки звуковыми линзами // Акустический журнал. – 1963. – Т. IX, вып. 4. – С. 473–480.
33. Born, E. Wolf. Principles of Optics. – 7th ed. – New York : Cambridge University Press. 1999. – 952 р.
34. Минин О. В., Минин И. В. Акустический аналог феномена фотонной струи // Вестник СГУГИТ. – 2016. – Вып. 1(33). – С. 139–147.
35. Kress R. Acoustic scattering // Scattering and Inverse Scattering in Pure and Applied Science / edited by E. R. Pike and P. C. Sabatier. – London : Academic, 2001.
36. Chen Z., Taflove A., Backman V. Photonic nanojet enhancement of backscattering of light by nanoparticles: a potential novel visiblelight ultramicroscopy technique // Optics Express. – 2004. – Vol. 12, No. 7. – P. 1214–1220.
37. Minin I. V., Minin O. V. Photonics of isolated dielectric particles of arbitrary 3D shape - a new direction of optical information technologies [Электронный ресурс] // Vestnik NSU. – 2014. – №. 12. – Режим доступа : <http://www.nsu.ru/xmlui/handle/nsu/7717>.
38. Minin I. V. and Minin O.V. Diffractive optics and nanophotonics: Resolution below the diffraction limit. – Springer, 2016.
39. 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). – 2015. – Vol. 363. – P. 491–497. DOI: 10.1002/and p.201500132.
40. Refractive index less than two: photonic nanojets yesterday, today and tomorrow / B. S. Lukiyanchuk, R. Paniagua-Domínguez, I. V. Minin, O. V. Minin and Z. Wang // Optical material express. – 2017. – Vol. 7(6). – P. 1820–1847.
41. Минин И. В., Минин О. В., Харитошин Н. А. Формирование фотонных тераструй от диэлектрических частиц, не обладающих осевой пространственной симметрией формы // Вестник СГГА. – 2014. – Вып. 4 (28). – С. 102–111.
42. Минин И. В., Минин О. В., Харитошин Н. А. Формирование зеркальных фотонных тераструй // Вестник СГГА. – Вып. 4 (28). – С. 87–94.
43. Пат. 2618600 Российская Федерация. Акустическая линза / Минин И. В., Минин О. В.; заявл. 09.02.2016.

Получено 02.03.2018

© O. V. Минин, И. В. Минин, 2018

THE SUPERRESOLUTION IN ACOUSTIC FOCUSING DEVICES

Oleg V. Minin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhonogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Dr. Sc., Professor, Department of Special Devices, Innovation and Metrology, phone: (383)361-07-31, e-mail: prof.minin@gmail.com

Igor V. Minin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhonogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Dr. Sc., Professor, Department of Special Devices, Innovation and Metrology, phone: (383)361-07-31, e-mail: prof.minin@gmail.com

The article considers the vital problem of increasing the spatial resolution of the sub-diffraction limit in acoustic systems. The electromagnetic and acoustic (elastic) waves are compared. Simple focusing acoustic devices are proposed that form "photonic" jets in acoustics (acoustojet). The main parameters of acoustojet are determined. The possibility of acoustojet formation by a cubic particle made from ABS plastic is experimentally demonstrated. Examples of the use of such devices are given. For the first time focusing of a sound wave with the superresolution is carried out.

Key words: an acoustic lens, a photon jet, acoustojet, diffraction limit, focusing of acoustic waves, the spatial resolution.

REFERENCES

1. Gregysh, P. (1982). *Zvukovidenie [Soundwave]*. Moscow: Mir Publ. [in Russian].
2. Bedniski, A., & Kovalev A. (2008). On the connection between the wavelengths of visible light and audible sound. *Fotonika [Photonics]*, 4, 38–39 [in Russian].
3. Minin, I. V., & Minin, O. V. (2004). *Diffractive optics of millimetre waves*. London: IOP Publisher.
4. Victors, I. A. (1981). *Zvukovye poverkhnostnye volny v tverdykh telakh [Sound superficial waves in firm bodies]*. Moscow: Science Publ. [in Russian].
5. Lord Rayleigh. (1885). On Waves Propagated along the Plane Surface of an Elastic Solid. *Proc. London Math. Soc.*, S1-17 (1), 4–11.
6. *Fizicheskaya entsiklopediya: T. 3 [The Physical encyclopedia, Vol. 3]*. (1994). A. M. Prokhorov (Ed.). Moscow: the Greater Russian Encyclopedia Publ. [in Russian].
7. Molotkov I. A. (1970). Excitation's Hammers of waves Reley and Stonly. In *Zapiski nauchnykh seminarov LOMI. Matematicheskie voprosy teorii rasprostraneniya voln [Mathematical Questions of the Theory of Distribution of Waves]* (pp. 168–183). Science Publ. [in Russian].
8. Tyndall, J. (1867). *Sound*. London: LONGMANS, GREEN, and CO.
9. Kircher, A. (1673). *Phonurgia nova sive conjugium mechanico-physicum artis & naturae paronympha phonosophia concinnatum. Kempten. R. Dreherr*. Germany.
10. Lamberto Tronchin. (2008). The 'Phonurgia Nova' of Athanasius Kircher: The Marvelous sound world of 17th century. *Proc. Mtgs. Acoust.*, 4, 015002. doi: 10.1121/1.2992053.
11. Carl Sondhauss. (1852). Uener die Refraction des Schalles. *Ann. Physik Chemie*, 85, 378–384.
12. Yakobson, I. I. (1949). Russian physicist N. F. Gezekhus. *Priroda [Nature]*, No. 7, Issue 38, 70–76 [in Russian].
13. Kudriavsev, S. P. (1956). *Istoriya fiziki: T. 2 [History of physics, Vol. 2]*. Moscow: State Educational and Pedagogical Publ. of the Ministry of Education of the RSFSR [in Russian].

14. Kasterin, N. P. (1904). On the Propagation of Waves in an Inhomogeneous Medium. *Uchenye zapiski imperatorskogo Moskovskogo universiteta, Otdel fiziko-matematicheskiy [Scientists of a Note of Imperial Moscow University, the Department Physical and Mathematical]*, Issue 20 [in Russian].
15. Kasterin N. P. (1898). On the propagation of waves in an inhomogeneous medium. *GRFHO*, 30, p. 61 [in Russian].
16. Minin, I. V., & Минин, О. В. (1999). *Difraktsionnaya kvazioptika i ee primeneniya [Diffraction quasi-optics and its applications]*. Novosibirsk: SibAGS [in Russian].
17. Giacomini. (1938). Alcuni Esperimenti di Ottica degli Ultrasuoni. *Alta Frequenza*, pp. 660–674.
18. Pohlman, R. (1938). Über die Möglichkeit einer akustischen Abbildung in Analogie zur Optischen. *Zeits. f. Physik.*, 113, p. 697.
19. Bez-Bardilli, W., & Ober ein Ultraschall. (1935). Total reflectometer zur Messung von Schallgeschwindigkeiten sowie der elastischen Konstanten fester Körper. *Zeits. f. Physik.*, 96, p. 761.
20. Minin, I. V., Minin, O. V., Triandaphilov, Y. R., & Kotlyar, V. V. (2008). Subwavelength diffractive photonic crystal lens. *Progress In Electromagnetics Research B (PIER B)*, pp. 257–264.
21. Minin, I. V., Minin, O. V., Triandaphilov, Y. R., & Kotlyar, V. V. (2008). Focusing Properties of Two Types of Diffractive Photonic Crystal Lens. *Optical Memory & Neural Networks (Information Optics)*, 17(3), 244–248.
22. Minin, I. V., & Minin, O. V. (2015). *Kvazioptika: sovremennye tendentsii razvitiya [Quasi optics: current trends of development]*. Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].
23. Prokhorov, A. M. (Ed.). (1983). *Fizicheskiy entsiklopedicheskiy slovar'* [Physical encyclopedic dictionary]. Moscow: Soviet Encyclopedia Publ. [in Russian].
24. Kirilov, V. A., Tverdokhlebov, V. I., & Homenko, V. I. (1964). Demonstration experience with an acoustic zone plate. *UFN*, 70(1), p. 166. [in Russian].
25. Kok, U. (1966). *Zvukovye i svetovye volny [Sound and light waves]*. Moscow: Mir Publ. [in Russian].
26. Minin, I. V., & Minin O. V. (Eds.). (2010). *Ultrasound imaging. Medical applications*. Austria: INTECH.
27. Oshchepkov, K., & Pirozhnikov, L. B. (1984). *Zvukovidenie [Soundvision]*. Moscow: Znanie Publ. [in Russian].
28. Kanevskii, I. N. (1977). *Fokusirovanie zvukovykh i ul'trazvukovykh voln [Focusing of sound and ultrasonic waves]*. Moscow: Nauka Publ. [in Russian].
29. Rayleigh, J. W. S. (1945). *The Theory of Sound: Vol. 1, 2*. New York: Dover Publications.
30. Rosenberg L. D. (1949). *Zvukovye fokusiruyushchie sistemy [Sound focusing system]*. Moscow–Leningrad: Academy of sciences of the USSR Publ. [in Russian].
31. Leontev, K. A. (1925). The Experimental research of diffraction of a sound. *Zhurnal Russkogo fiziko-khimicheskogo obshchestva [Journal of the Russian Physico-Chemical Society]*, p. 49. [in Russian].
32. Tartakovsky, B. D. (1963). Diffraction structure of the image of a point by sound lenses. *Akusticheskiy zhurnal [Acoustic journal]*, IX(4), 473–480 [in Russian].
33. Born, E. Wolf. (1999). *Principles of Optics* (7th ed). New York: Cambridge University Press.
34. Minin, O. V., & Minin, I. V. (2016). Acoustical analogue of photonic jet phenomenon. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 1(33), 139–147 [in Russian].
35. Kress, R. (2001). Acoustic scattering. In *Scattering and Inverse Scattering in Pure and Applied Science*. E. R. Pike, & P. C. Sabatier (Eds.). London: Academic.

36. Chen, Z., Taflove, A., Backman, V. (2004). Photonic nanojet enhancement of backscattering of light by nanoparticles: a potential novel visiblelight ultramicroscopy technique. *Optics Express*, 12(7), 1214–1220.
37. 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>.
38. Minin, I. V., & Minin, O. V. (2016). *Diffractive optics and nanophotonics: Resolution below the diffraction limit*. Springer
39. Minin, I. V., Minin, O. V., & Geintz, Y. E. (2015). Localized EM and photonic jets from non-spherical and non-symmetrical dielectric mesoscale objects: brief review. *Annalen der Physik (AdP)*, 363, 491–497. doi: 10.1002/and p.201500132.
40. Lukiyanchuk, B. S., Paniagua-Domínguez, R., Minin, I. V., Minin, O. V., & Wang Zengbo. (2017). Refractive index less than two: photonic nanojets yesterday, today and tomorrow. *Optical material express*, 7(6), 1820–1847.
41. Minin, I. V., Minin, O. V., & Kharitoshin, N. A. (2014). Formation photon terajet from the dielectric particles which are not possessing axial spatial symmetry of the form. *Vestnik SGGA [Vestnik SSGA]*, 4(28), 102–111 [in Russian].
42. Minin, I. V., Minin, O. V., & Kharitoshin N. A. (2014). Formation mirror photon тепаст-рүй. *Vestnik SGGA [Vestnik SSGA]*, 4(28), 87–94 [in Russian].
43. Minin, I. V., Minin, O. V. (2016). Patent RF No. 2618600. Novosibirsk: IP Russian Federation.

Received 02.03.2018

© O. V. Minin, I. V. Minin, 2018