

УДК 534.18, 534.1

ФОКУСИРОВКА РАСХОДЯЩЕГОСЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПУЧКА ПЕРИОДИЧЕСКОЙ 2D СТРУКТУРОЙ В ДВА ФОКУСА

К. Ф. Шипилов¹, Л. М. Крутянский^{1,2}

Предварительно сфокусированный (сферически расходящийся) ультразвуковой пучок был направлен на структуру металлических стержней, имеющую двумерную периодичность и ограниченную отражающими поверхностями в измерении, в котором эта периодичность отсутствовала. Для частоты ультразвука, взятой на верхней границе полосы “прозрачности” структуры, было получено расщепление акустического изображения объекта-фокуса в два максимума, расположенных вдоль направления однородности образца.

Ключевые слова: периодическая 2D структура, отрицательное преломление, плоская линза.

Ровно пятьдесят лет тому назад В. Г. Веселаго [1] проанализировал особенности поведения необычных сред, обладающих одновременно отрицательными значениями диэлектрической и магнитной проницаемостей и отрицательным показателем преломления, но только через 32 года после его работы были экспериментально исследованы [2, 3] среды с отрицательным показателем преломления в микроволновом диапазоне длин волн. В. Г. Веселаго показал, что для сред с отрицательным показателем преломления характерна необычная реализация ряда явлений электродинамики и оптики: закона Снеллиуса, эффектов Доплера и Черенкова, формул Френеля, принципа Ферма и других. Отрицательный показатель преломления и нарушение закона Снеллиуса были реализованы в фотонных кристаллах [4, 5]. Фотонный кристалл ведет себя как среда, эффективный показатель которой зависит от зонной структуры кристалла.

¹ НЦВИ ИОФ РАН, 119991 Россия, Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: kfship@kapella.gpi.ru.

² Международная ассоциированная лаборатория критических и сверхкритических явлений в функциональной электронике, акустике и флюидике, НЦВИ ИОФ РАН, 119991 Россия, Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: leonid.krut@gmail.com.

Аналогичные явления для акустических волн наблюдали и исследовали в фононных кристаллах. Экспериментально и теоретически было показано, что плоская линза, сформированная двумерным фононным кристаллом с отрицательным показателем преломления в некотором диапазоне частот, может фокусировать изображение линейного источника излучения со сверхразрешением [6].

В одной из наших работ [7] было показано, что одна и та же периодическая двумерная структура, скомпонованная из металлических стержней, может успешно работать в акустическом и электромагнитном диапазонах частот. Эта 2D структура позволила получить с высоким разрешением 3D отображения пьезокерамического источника ультразвука или СВЧ излучателя, как стандартная сферическая линза.

Традиционно, двумерные структуры исследуют как фокусирующие системы без выделенных оптических осей, при этом не учитывают их конечные пространственные размеры, высоту и ширину, а принимают в расчет только длину. Между тем реальный фононный кристалл всегда имеет конечные поперечные размеры. Преломление и рассеяние возбуждающего излучения на границах периодической структуры может существенно изменить распределение поля, формируемого структурой. Следовательно, необходимо принимать во внимание или, если это необходимо, использовать ограниченные размеры 2D структуры для получения требуемых сфокусированных изображений. Нами, с целью получения двух синфазных изображений источника ультразвукового излучения, исследована 2D структура, ограниченная с двух противоположных сторон параллельными отражающими поверхностями.

В этом письме мы представляем экспериментальные результаты, которые показали, что ограниченный с двух сторон фононный кристалл с 2D периодичностью может сфокусировать расходящийся ультразвуковой пучок в два фокальных максимума.

Образец, экспериментальная установка и метод. Упрощенная схема установки показана на рис. 1(а). 2D структура была изготовлена из стальных стержней диаметром 1.85 мм и длиной 35 мм. Стержни выстроены параллельно и упорядочены в 8 рядов по 10 штук в каждом. С обеих сторон концы стержней фиксировали со сдвигом между рядами в двух параллельных поливинилхлоридных (ПВХ) пластинах так, что в поперечном сечении структура образовывала треугольную решетку с периодом 2.77 мм. Пластины ПВХ имели толщину 5 мм и находились на расстоянии 25 мм друг от друга. Таким образом, структура имела вдоль стержней высоту 25 мм, ширину около 30 мм и толщину 21 мм.

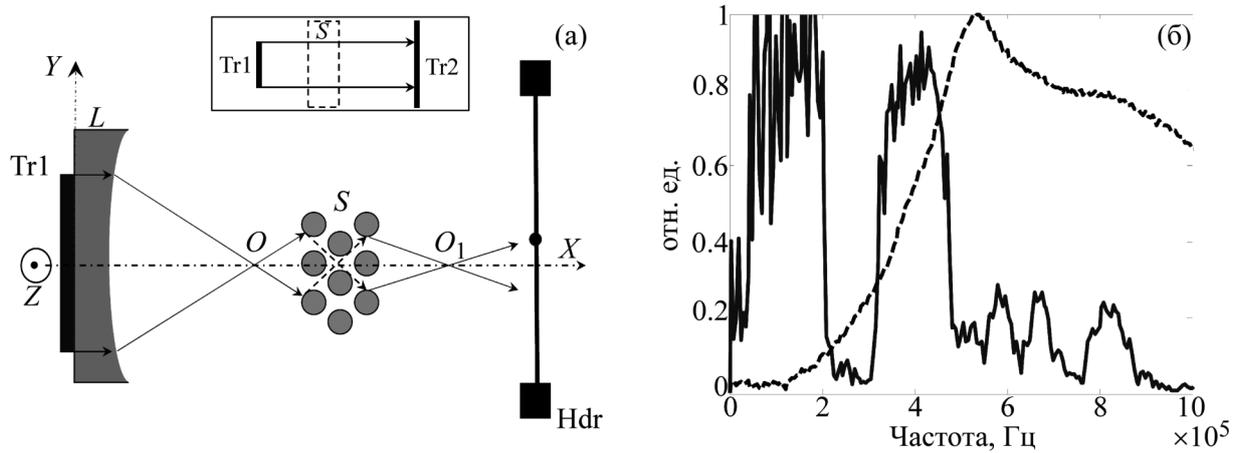


Рис. 1: Упрощенная схема эксперимента (а) и частотная зависимость коэффициента пропускания образца (б). $Tr1$, $Tr2$ – пьезоэлектрические ультразвуковые преобразователи, S – схематическое изображение структуры, X , Y , Z – лабораторная система координат, L – акустическая собирающая линза, $Hдр$ – мембранный гидрофон. O , O_1 – акустический фокус и его изображение после структуры соответственно. Стрелками условно обозначено направление распространения ультразвуковых пучков. Штриховой кривой на графике (б) показан спектр широкополосного импульса после прохождения измерительного тракта без образца, сплошная кривая – отношение спектров сигналов, принятых с образцом и без него. На вставке схематически показана конфигурация для измерения частотной зависимости коэффициента пропускания ультразвука.

Предварительно для данной структуры с помощью импульсного сравнительного метода (см. напр., [8, 9]) была измерена частотная зависимость коэффициента пропускания ультразвука. Геометрия метода условно показана на вставке на рис. 1(а). Образец размещали в воде между излучателем и приемником ультразвука. Для измерений использовали плоские широкополосные ультразвуковые преобразователи Panametrics диаметром 25 мм и центральными частотами 1 МГц и 5 МГц для излучателя и приемника соответственно. С целью исключить влияние краев образца апертура излучателя была уменьшена до диаметра 16 мм с помощью резиновой диафрагмы (на рисунке не показана). Излучатель возбуждался прямоугольными импульсами длительностью 0.5 мкс, пиковым значением напряжения 50 В и частотой повторения 100 Гц. Импульсы создавались генератором AFG 3102 (Sony Tektronix) и усиливались ВЧ усилителем мощности KL400 (RM-Italy). Сигнал с приемного преобразователя регистрировался и

оцифровывался осциллографом DPO 2022 (Sony Tektronix) во временном окне 200 мкс с частотой $5 \cdot 10^8$ отсчетов в секунду. Для повышения точности использовали усреднение по 512 выборкам.

Вторая, основная серия экспериментов, проводилась со сфокусированным акустическим пучком, при этом фокус играл роль малого объекта, помещенного перед структурой. Для этого вблизи поверхности описанного выше излучателя была помещена линза из оргстекла, фокусирующая ультразвук. Расчетное геометрическое фокусное расстояние линзы (высокочастотное приближение) составляло в воде 60 мм. В данных экспериментах диафрагмирование пучка уже не производили и использовали полную апертуру излучателя 25 мм. Образец помещали в воду и закрепляли так, что его середина находилась на оси симметрии фокусирующей акустической системы, а ближайшая к излучателю поверхность структуры отстояла от него на 56 мм. Измерения акустического поля проводили с помощью широкополосного мембранного гидрофона, имеющего диаметр чувствительного элемента 0.5 мм. Гидрофон перемещали по трем направлениям позиционирующей системой Velmex BiSlide с точностью 0.1 мм. Сигнал с гидрофона принимался осциллографом и усреднялся по 16 выборкам. На излучатель подавали возбуждающие импульсы с несущей частотой 475 кГц, длительностью 50 мкс и частотой повторения 100 Гц. Окно времени выборки осциллографа устанавливалось равным 50 мкс, а его начало автоматически подстраивалось под момент прихода звукового импульса в соответствии со смещением гидрофона вдоль оси распространения звука (ось X). В качестве измеряемой величины регистрировалась амплитуда основной гармоники несущей частоты.

Результаты экспериментов. Частотную характеристику структуры определяли как отношение фурье-спектров прошедшего широкополосного сигнала с образцом и без него. Полученная таким образом кривая представлена сплошной линией на рис. 1(б). Штриховой линией показана опорная частотная характеристика измерительного акустического тракта без образца, нормированная на свой максимум. Исходя из проведенных измерений, частотная область от 310 кГц до 480 кГц может считаться областью “прозрачности”. Область ниже 200 кГц, хотя и выглядела как хорошо пропускающая, не могла считаться надежной для измерений, поскольку из-за сильного ослабления измерительного тракта на этих частотах было высоко влияние шумов и прочих погрешностей. По результатам этих измерений для основной серии экспериментов была выбрана частота 475 кГц, находящаяся на верхней границе первой надежно определенной полосы пропускания.

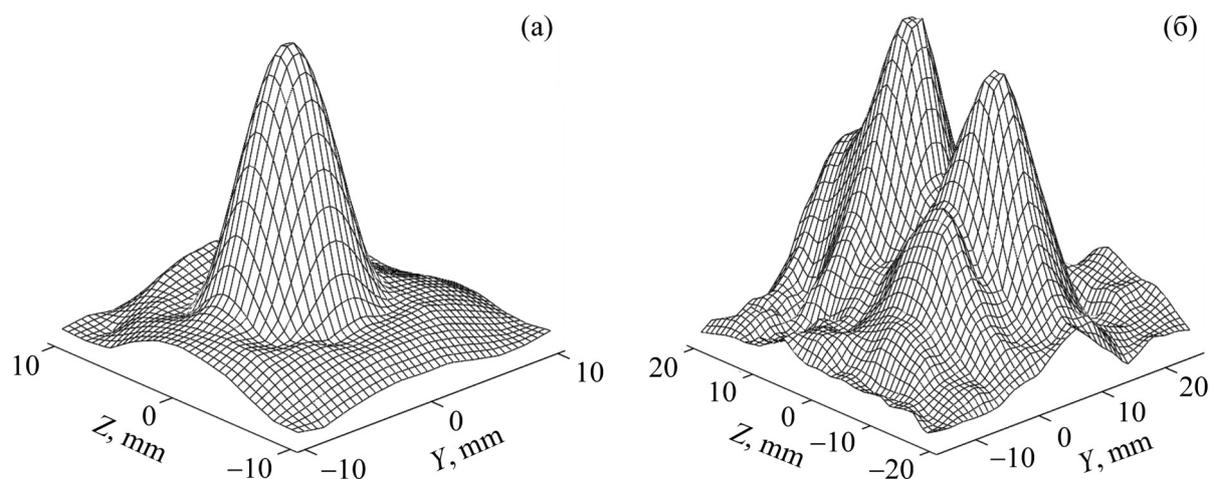


Рис. 2: Нормированные 2D распределения поля давления: (а) в фокальной плоскости падающего пучка и (б) в плоскости максимальной амплитуды на расстоянии 38 мм за образцом.

Фокальное распределение акустического поля, формируемого излучателем с линзой, измеряли перемещаемым в поле гидрофоном. Обычно фокальные измерения поля излучателя предполагают: 1) нахождение оси пучка, 2) продольные измерения вдоль оси, нахождение фокуса как точки максимума амплитуды и 3) поперечное сканирование пучка на найденном фокальном расстоянии в плоскости, ортогональной оси. Следуя этой процедуре, было установлено, что на выбранной частоте 475 кГц акустический фокус O линзы находился на расстоянии 33 мм от излучателя. В этой плоскости было получено распределение звукового давления, показанное на рис. 2(а). Измерения проводили в области 20×20 мм с шагом 2 мм, за исключением центральной зоны 10×10 мм, где шаг составлял 1 мм. В пределах центрального максимума распределение хорошо соответствует линейной модели для сфокусированного излучателя поршневого типа в условиях заданной частоты и геометрии (апертура и геометрооптический фокус). Явно выраженные боковые лепестки, предсказываемые моделью поршневого излучателя, не наблюдались, что вероятней всего объясняется спаданием амплитуды от оси пучка к его периферии из-за дополнительного затухания в материале вогнутой линзы.

Таким образом, падающее на структуру поле представляло собой ультразвуковой пучок, предварительно сфокусированный в область, расположенную на расстоянии ~ 23 мм от образца. Диаметр фокуса, измеренный по уровню 0.7 от максимума, составлял примерно 4.5 мм.

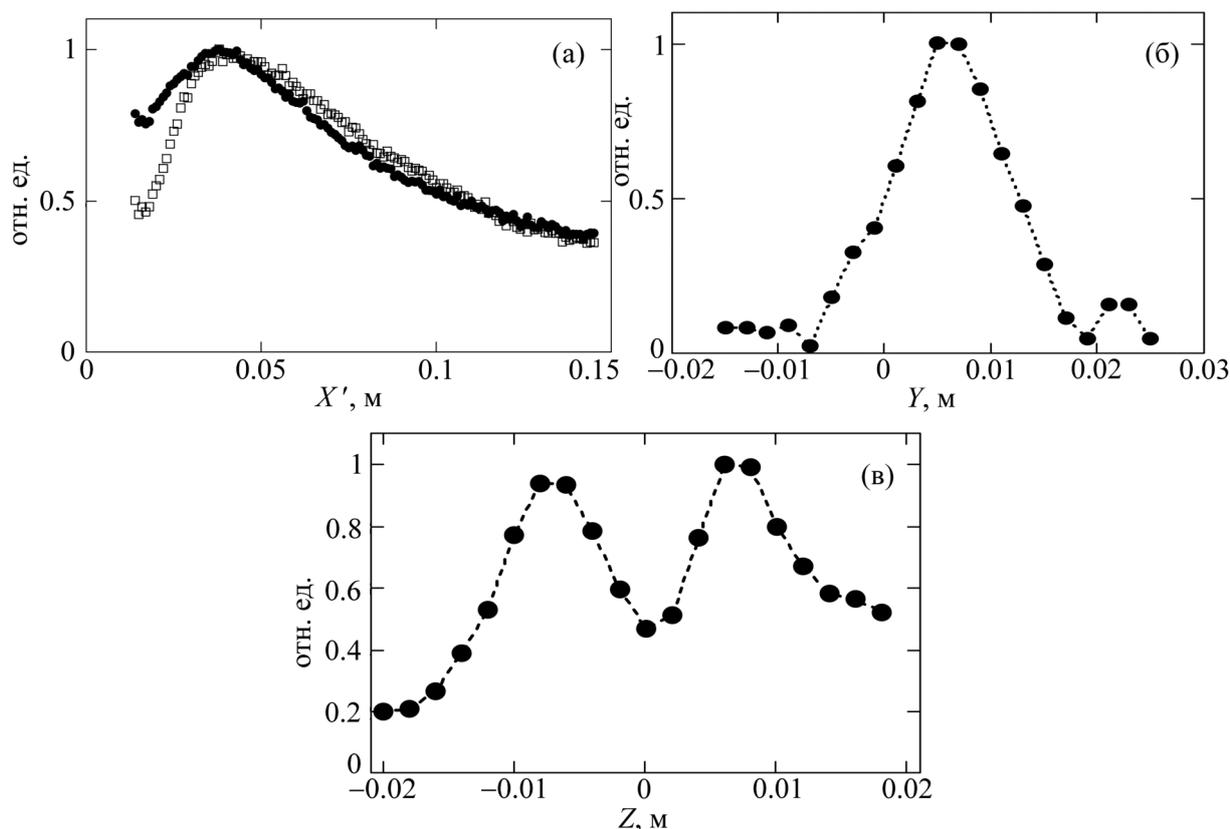


Рис. 3: Нормированное поле давления после структуры: (а) – продольные распределения вдоль двух осей локальной симметрии, кружки – для оси, проходящей через верхний максимум ($Z > 0$), квадраты – для оси, проходящей через нижний максимум ($Z < 0$); каждая из кривых нормирована на свой максимум, X' – расстояние по оси X , измеряемое от образца. (б), (в) – поперечные распределения на расстоянии $X' = 38$ мм; (б) – распределение вдоль оси Y при $Z = 6$ мм, (в) – распределение вдоль оси Z при $Y = 7$ мм.

Измеренное акустическое поле после прохождения структуры представлено на рис. 2(б) и рис. 3. Поскольку ожидаемый отрицательный показатель преломления звука должен приводить к фокусировке поля, была проведена процедура поиска фокальной плоскости аналогично тому, как и для падающего пучка. Полученное в результате поперечное 2D распределение (рис. 2(б)) охватывает область 40×40 мм с шагом 2 мм. Видно, что поле за структурой имело не одну, а две зоны фокусировки. Максимумы оказались расположены достаточно симметрично относительно плоскости $Z = 0$. Было установлено, что поле, сформированное после прохождения образца, соответствует

случаю двух одновременно распространяющихся сфокусированных пучков. Так же, как было описано выше, были найдены две оси локальной симметрии и построены продольные распределения звукового давления вдоль этих осей, и поперечные распределения в плоскости фокусировки, приведенные на рис. 3. Кривые на рис. 3(а) для продольных распределений показывают, что два наблюдаемых на рис. 2(б) максимума были действительно расположены на одинаковом удалении (38 мм) от образца. В плоскости XU оси двух пучков не совпадали с осью X , а отклонялись на 7 мм в сторону положительных значений U . Это отклонение можно объяснить не строго выдержанной ортогональностью структуры и оси звукового пучка при том, что преломление звука происходит в соответствии с направлением истинной нормали к структуре. На рис. 3(б) и 3(в) приведены одномерные поперечные распределения на расстоянии $X = 38$ мм от образца вдоль U и Z соответственно. Распределение по U на рис. 3(б) построено для $Z = 6$ мм, т.е. проходит через верхний максимум наблюдаемой пары. Кривая на рис. 3(в) построена для $U = 7$ мм, что соответствует наблюдавшемуся отклонению обоих максимумов по U .

Обсуждение результатов. В проведенных экспериментах показано, что изготовленный образец структуры с двумерной периодичностью может обеспечить 3D фокусировку звукового пучка. Наблюдаемая фокусировка была достаточно хорошей в плоскости периодичности структуры. В плоскости, параллельной элементам структуры, фокусировка расщеплялась в два максимума. Таким образом, в результате экспериментальных исследований впервые обнаружено, что двумерная структура, ограниченная двумя отражающими поверхностями, формирует два сфокусированных изображения одного источника излучения. Причем оба изображения имеют практически одинаковые пространственные трехмерные распределения и интенсивность.

Следовательно, при исследовании периодических структур необходимо учитывать их ограниченные размеры, а также можно специально устанавливать отражающие поверхности для управления параметрами формируемого структурой поля излучения. Как показано в [7], эти же соображения должны быть справедливы и при работе с периодическими структурами в электромагнитном диапазоне частот.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-02-00675.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] В. Г. Веселаго, УФН **92**, 517 (1967).
- [2] D. R. Smith, W. J. Padilla, D. C. Vier, et al., Phys. Rev. Lett. **84**, 4184 (2000).
- [3] R. A. Shelby, D. R. Smith, and Shultz, Science **292**, 79 (2001).
- [4] M. Notomi, Phys. Rev. B **62**, 10606 (2000).
- [5] C. Lao, S. G. Johnson, J. D. Joannopoulos, and J. B. Pendry, Phys. Rev. B **65**, 045115 (2003).
- [6] A. Sukhovich, B. Merheb, K. Muralidharan, et al., Phys. Rev. Lett. **102**, 154301 (2009).
- [7] Е. А. Виноградов, В. А. Бабинцев, В. Г. Веселаго и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **38**(8), 3 (2011).
- [8] P. He, Ultrasonics **37**, 67 (1999).
- [9] J. O. Vasseur, P. A. Deymier, B. Chenni, et al., Phys. Rev. Lett. **86**, 3012 (2001).

Поступила в редакцию 13 февраля 2017 г.