

## АВТОФОКУСИРОВКА УЛЬТРАЗВУКА НА СЛУЧАЙНЫЕ РАСSEИВАЮЩИЕ ОБЪЕКТЫ В ЖИДКОСТИ С ПОМОЩЬЮ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ОБРАЩЕНИЯ ВОЛНОВОГО ФРОНТА

*А.П.Брысев, Ф.В.Бункин, Л.М.Крутянский\*, В.Л.Преображенский\*,  
Ю.В.Пыльнов\*, А.Д.Стаховский*

*Институт общей физики РАН  
117333 Москва, Россия*

*\*Московский институт радиотехники, электроники и автоматики  
117454 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 23 декабря 1994 г.

После переработки 19 января 1995 г.

Экспериментально реализован и оптически визуализирован эффект автофокусировки звука на поток воздушных пузырей в воде с помощью параметрического обращения волнового фронта в твердом теле. В качестве активной среды, обращающей волновой фронт рассеянного пузырями ультразвука, использован феррит на основе  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  в переменном магнитном поле продольной накачки.

Интерес к процессам обращения волнового фронта (ОВФ) звука в значительной мере обусловлен возможностью использования этого явления для автофокусировки волн на рассеивающие объекты в акустически прозрачной среде, в том числе на случайно распределенные. Особый интерес представляют физические процессы ОВФ с усилением в реальном масштабе времени.

Механизмы ОВФ звука в нелинейных и параметрических средах неоднократно обсуждались, в частности, в связи с развитием техники ОВФ в нелинейной оптике [1 – 3]. В последние годы наиболее важные экспериментальные результаты по ОВФ ультразвука с усилением были получены на никелевых ферритах [4 – 6]. Обращение фронта наблюдалось при параметрической накачке феррита импульсным радиочастотным магнитным полем. В условиях сильной неравновесности активной среды за порогом абсолютной параметрической неустойчивости магнитоупругих волн усиление обращенной волны по отношению к падающей превышало 90 дБ. Высокая интенсивность звука в обращенной волне облегчает использование методов оптической визуализации звуковых полей. С помощью визуализации было продемонстрировано обращение в феррите фронта плоских и цилиндрических ультразвуковых волн в оптически прозрачных твердых телах и жидкостях [4, 5].

В настоящей работе наблюдалось явление автофокусировки звука на движущиеся в жидкости рассеивающие объекты, реализованное с помощью запорогового параметрического ОВФ в феррите. В отличие от экспериментов в работах [4, 5], когда практически весь сигнальный пучок попадал в активную ОВФ среду, в данной работе условия для ОВФ были более жесткими: только небольшая часть рассеянного объектами сигнального пучка участвовала в параметрическом взаимодействии в феррите.

Схема экспериментальной установки приведена на рис.1. Импульсная сигнальная ультразвуковая волна длительностью 40 мкс и частотой заполнения 5,7 МГц излучалась пьезопреобразователем диаметром 24 мм, помещенным в бассейн с водой. Сигнальная волна направлялась в сторону потока воздушных

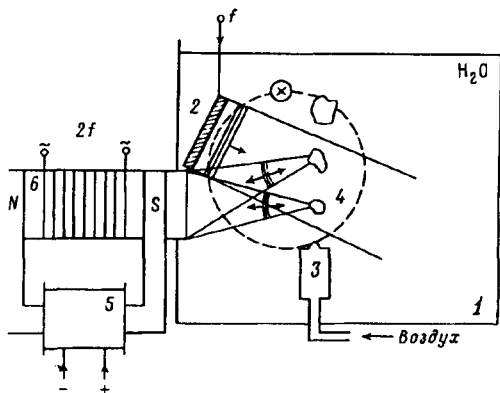


Рис.1. Схема экспериментальной установки. 1 – бассейн, 2 – ультразвуковой пьезопреобразователь, 3 – форсунка, 4 – поток пузырей, 5 – электромагнит, 6 – ферритовый образец с катушкой накачки; штриховой линией показана область наблюдения, x – направление светового пучка

пузырей и после рассеяния на них попадала на торцевую поверхность феррита. Поток пузырей создавался электронасосом, соединенным гибкой трубкой с форсункой. Регулировка размеров пузырей осуществлялась за счет изменения воздушного напора в соединительной трубке. Размеры пузырей находились в пределах 3–15 мм, что значительно превышало длину ультразвуковых волн в воде  $\lambda = 0,26$  мм. Образец поликристаллического феррита, использовавшийся в качестве параметрической среды, имел форму цилиндра диаметром 38 мм и длиной 150 мм. Феррит был изготовлен из шихты со следующим составом (в молярных процентах):  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 46,8,  $\text{CoO}$  – 1,28,  $\text{CuO}$  – 1,34,  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  – 1,49, остальное –  $\text{NiO}$ . Образец служил частью магнитопровода электромагнита, создававшего поле подмагничивания напряженностью  $H \approx 400$  Э. Продольная параметрическая накачка двойной звуковой частоты осуществлялась с помощью катушки выходного контура генератора радиоимпульсов с импульсной выходной мощностью до 50 кВт. Длина катушки составляла 70 мм. Длительность импульсов накачки варьировалась в пределах 70–100 мкс. Амплитуда поля накачки превышала порог абсолютной параметрической неустойчивости по меньшей мере в 2,5 раза. Порог определялся по возникновению спонтанной параметрической генерации звука в отсутствие сигнальной волны. Визуализация звуковых полей производилась теньевым методом в стробоскопическом режиме. Для освещения использовалась вторая гармоника излучения импульсного неодимового лазера. Апертура лазерного луча расширялась коллиматором до диаметра 100 мм. Расширенный пучок направлялся через исследуемую область в жидкости параллельно торцевой поверхности феррита и плоскости пьезопреобразователя. После выхода из бассейна световой пучок проходил через собирающую линзу. Нулевого порядка дифракции Рамана–Ната специально перекрывался точечным экраном не полностью, чтобы с помощью прошедших лучей сформировать изображение пузырей. В этом случае их можно было легко наблюдать одновременно с изображениями ультразвуковых полей. Полученная картина проектировалась на плоский экран и регистрировалась с помощью видеокамеры. Приведенные в работе фотографии сделаны с экрана видеомонитора в режиме стоп-кадра. Импульсы сигнальной звуковой волны, накачки и света синхронизировались по времени друг относительно друга с варьируемой задержкой, что позволяло наблюдать прохождение импульсов сигнальной и обращенной волн через область визуализации в разные моменты времени.

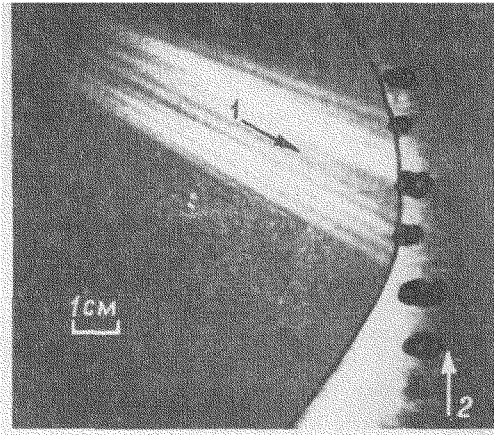


Рис.2. Изображение импульса сигнальной волны, излученной пьезопреобразователем на поток пузырей. 1 – импульс сигнальной волны; 2 – пузыри. Стрелками указано направление распространения ультразвуковой волны и пузырей

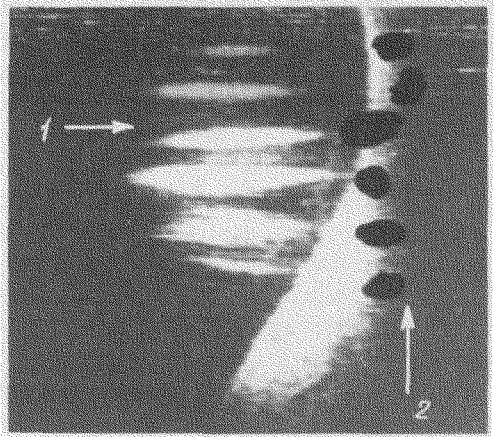
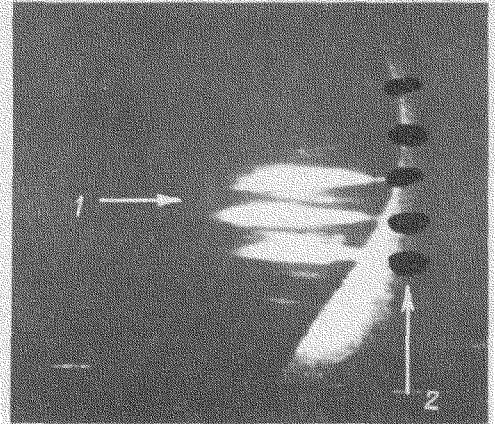
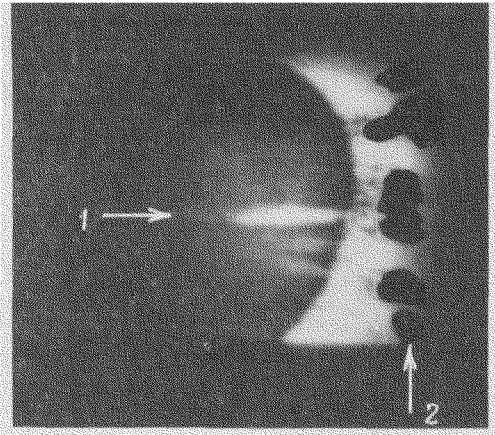


Рис.3 Изображение сфокусированных на пузыри ультразвуковых импульсов. 1 – сфокусированные на пузыри ультразвуковые импульсы; 2 – пузыри. Стрелками указаны направления распространения ультразвуковых импульсов и пузырей; а – автофокусировка ультразвука на один пузырь, попавший в апертуру сигнального пучка; б, с – автофокусировка ультразвука одновременно на несколько пузырей в апертуре сигнального пучка

Рис.3.

На рис.2 представлено изображение сигнального ультразвукового импульса, облучающего пузыри. Светлая область в форме полумесяца, расположенная справа на этом и последующих изображениях, образовалась вследствие неполного перекрытия нулевого порядка дифракции. Слева эта светлая область

ограничена зоной тени экрана, а справа – краем апертуры лазерного пучка. Таким образом, изображения пузырей получались в виде темных пятен на светлой области, а ультразвуковых полей – в виде светлых областей на фоне тени экрана. При включении поля накачки во время распространения по объему активной зоны феррита импульса сигнальной волны, рассеянной на пузырях, в пространственной области между пузырями и торцом феррита наблюдалось интенсивное излучение звуковых волн, направленных на пузыри. Соответствующие изображения представлены на рис.3. Отчетливо видна автофокусировка обращенных волн на пузыри, при этом их количество и расположение, как видно, могут быть достаточно произвольными. Для фокусировки в такой схеме необходимо только попадание рассеянного объектами излучения в ОВФ среду. Указанные свойства делают обоснованным использование термина "автофокусировка". В экспериментах область автофокусировки ограничивалась апертурой сигнального пучка и шириной угловой зависимости эффективности ОВФ в ферритовом образце, исследованной в [5]. Отметим, что условия рассеяния сигнальной волны определяются случайным характером формы и ориентации нестационарной отражающей поверхности пузыря. Поэтому могут быть и такие пузыри, фокусировка на которые не наблюдается (верхние пузыри на рис.3а, б). В звуковом поле, излучаемом ферритом, регистрировалась часть акустических лучей, направления которых не коррелировали с пространственным расположением пузырей. Появление такой "необращенной" компоненты звукового поля, исчезающей в отсутствие сигнальной волны, по-видимому, обусловлено сложными многократными отражениями волн внутри феррита и ограниченностью его апертуры. Искажение структуры звукового поля при ОВФ частично связано и с неравномерностью распределения эффективности обращения по углам падения сигнальных волн на торцевую поверхность феррита [5]. Это распределение может быть заметно выровнено за счет усложнения геометрии активного элемента. Анализ имеющихся на этот счет данных является предметом отдельного рассмотрения и выходит за рамки настоящего сообщения.

В целом полученные экспериментальные данные свидетельствуют о возможности использования запороговых параметрических процессов в поликристаллических ферритах для экспериментальной реализации разнообразных, специфических для ОВФ, эффектов в акустике в реальном масштабе времени.

Авторы благодарят И.Н.Андрееву и Н.Н.Рыжова за помощь в разработке и изготовлении активного элемента.

Работа выполнена при поддержке Международного научного фонда по проекту MJZ000, а также Российского фонда фундаментальных исследований, проект 1993-02-15458.

- 
1. Ф.В.Бункин, Д.В.Власов, Ю.А.Кравцов. Квантовая электроника, **8** 1144 (1981).
  2. Ф.В.Бункин, Д.В.Власов, Ю.А.Кравцов, в сб. Обращение волнового фронта излучения в нелинейных средах, Горький; Изд. ИПФ АН СССР, 1982, с.63.
  3. Ф.В.Бункин, Д.В.Власов, Ю.А.Кравцов. Препринт ФИАН №90 (1982).
  4. A.Brysev, F.Bunkin, L.Krutiansky et al., *Opt.&Acoust. Rev.* **1**, 107 (1990).
  5. L.Krutiansky, V.Preobrazhensky, Yu.Py'lnov et al., *Phys. Lett. A164*, 196 (1992).
  6. V.Preobrazhensky, *Jpn. J. Appl. Phys.* **32**, 2247 (1993).