

АКУСТИКА И АКУСТООПТИКА

Сегментация различных клинических случаев гематом для дальнейшего планирования операций с использованием HIFU	
<i>А.С. Бобина, П.В. Юлдашев, В.А. Хохлова</i>	5
Акустооптическое качество оптически двуосного кристалла LNM	
<i>М.Г. Мильков, В.А. Сухарев, Д.Ю. Великовский</i>	9
Взаимодействие регулярных и шумовых слабых сигналов с фронтом ударной волны	
<i>С.Н. Гурбатов, О.В. Руденко, А.В. Тюрина</i>	14
Особенности дисперсии клиновых волн в цилиндрических образцах с внешней и внутренней конусообразной поверхностью клина	
<i>А.И. Коробов, А.А. Агафонов, М.Ю. Изосимова, А.И. Кокшайский, Р.А. Жостков</i>	18
Возможности доплеровского метода для измерения упругости мышц	
<i>Ш.А. Асфандияров, В.Г. Андреев, Т.Б. Крит</i>	22
Многokратное отражение акустических волн в кристалле парателлурита и его применения в акустооптике	
<i>Н.В. Поликарпова, В.Б. Волошинов</i>	25
Инвариантность двумерной задачи акустооптического взаимодействия к направлению вектора расстройки	
<i>Е.А. Дьяконов</i>	28
Использование наночастиц пористого кремния и акустической кавитации для направленной доставки лекарств	
<i>В.Д. Егошина, В.Г. Андреев</i>	32
Разрушение тромбов фокусированным ультразвуком	
<i>Я.Е. Жицкая, А.А. Лешина</i>	34
Использование характеристик рассеяния ультразвуковой волны на упругом шаре для определения его акустических параметров	
<i>Л.М. Котельникова, Д.А. Николаев, С.А. Цысарь, О.А. Сапожников</i>	36
Исследование влияния структуры акустического поля на характеристики акустооптического взаимодействия в двуосных кристаллах в ячейке с антифазным возбуждением соседних секций	
<i>М.И. Купрейчик, В.И. Балакиши</i>	40
Численное моделирование и 3D визуализация сдвиговых волн в мягких биологических тканях	
<i>А.А. Лисин, И.Ю. Демин</i>	44
Регистрация образования наночастиц при ультразвуковой абляции гипсового фантома почечного камня в воде	
<i>А.П. Брысев, Р.В. Клопотов, Д.И. Макалкин</i>	47

Экспериментальная реализация нелинейного параметрического взаимодействия капиллярно-гравитационных волн, индуцированного радиационным давлением ультразвука	
<i>Л.М. Крутянский, В.Л. Преображенский, Д.И. Макалкин, А.П. Брысев, Р. Pernod....</i>	51
Акустооптические характеристики двулучепреломляющих кристаллов ультрафиолетового диапазона альфа- и бета-BaB₂O₄	
<i>М.В. Марунин, В.Б. Волошинов</i>	55
Разработка цилиндрической акустической линзы для управления амплитудно-фазовыми характеристиками оптического излучения	
<i>А.В. Быханов, А.С. Мачихин, В.Э. Пожар, А.Б. Козлов</i>	58
Исследование скалярно-векторных характеристик акустического поля с помощью разнесенных в пространстве комбинированных приемных модулей	
<i>Е.В. Медведева, Б.И. Гончаренко, А.С. Шуруп</i>	61
Исследование воздействия акустических волн на электронный транспорт в металлических нанопроводах	
<i>А.Е. Мельников, Е.С. Солдатов, С.А. Дагесян, В.В. Колесов, И.Е. Кузнецова.....</i>	64
Пикосекундная акустика в наноструктурах со сверхбыстрым фазовым переходом	
<i>Я.А. Мозунов, А.Е. Федянин, F. Fernández, S. Lysenko, A.J. Kent, А.В. Щербаков, А.М. Калашиникова, А.В. Акимов.....</i>	66
Акустооптическая дифракция терагерцевого излучения в сжиженном элегазе при комнатной температуре	
<i>П.А. Никитин, А.К. Никитин</i>	70
Оценка параметров акустооптических устройств управления терагерцевым излучением на основе монокристаллов	
<i>П.А. Никитин</i>	72
Методы визуализации акустических полей в жидкостях	
<i>А.И. Перятинская, Е.Д. Стеняева, К.Н. Антонов, С.А. Петросян</i>	74
Влияние различных траекторий перемещения фокуса на равномерность тепловых эффектов при импульсном нелинейном воздействии ультразвукового фокусированного пучка на биологическую ткань	
<i>П.А. Пестова, М.М. Карзова, П.В. Юлдашев, В.А. Хохлова.....</i>	78
Возбуждение акустических полей с орбитальным угловым моментом в цилиндрических резонаторах с некоаксиально подсоединенными волноводами	
<i>А.С. Пилипчук, А.А. Пилипчук.....</i>	82

Анализ широкоапертурной геометрии взаимодействия в акустооптическом кристалле бромида ртути <i>Д.Л. Пороховниченко, Чж. Рю, Д.В. Зинкин, В.Б. Волошинов</i>	84
Дифракционные методы исследования периодических доменных структур в сегнетоэлектрических кристаллах <i>Е.Н. Савченков, С.М. Шандаров, С.В. Смирнов, М.В. Бородин, В.А. Краковский, Л.Я. Серебренников, А.Е. Шараева, А.А. Есин, А.Р. Ахматханов, В.Я. Шур</i>	88
Модуляция ИК излучения в слоистой структуре с использованием карбида кремния <i>И.М. Сопко, Г.А. Князев</i>	91
Реализация метода Supersonic Shear Wave Elastography на акустической системе Verasonics и сравнение с методом SWEI <i>А.Е. Спивак, А.Е. Симонов</i>	95
Углы преломления и направления векторов групповых скоростей волн ТЕ и ТМ поляризации на границе изотропной среды и полупространства с магнитоэлектрическими эффектом <i>С.К. Глеуконов, Ж.Н. Суйеркулова, В.Г. Можжев</i>	97
Акустооптический метод визуализации микрообъектов на основе двойного преобразования Фурье <i>Е.Л. Никишин, М.В. Павлова, А.В. Сучилин</i>	101
Ультразвуковая визуализация в слоистых объектах с помощью разложения пространственно–временного сигнала в спектр плоских волн <i>С.А. Титов, П.В. Зинин</i>	105
Изучение свойств физиологического раствора при смешивании с высокоразбавленным раствором NaCl методом акустической спектроскопии <i>А.А. Харчевский, М.Е. Асташев, Н.Н. Родионова, Г.О. Степанов, С.А. Тарасов</i>	108
Акустооптический эффект на сдвиговых акустических волнах в кристалле KRS-5 <i>В.С. Хоркин, М.С. Кузнецов, К.А. Субботин, В.Б. Волошинов</i>	111
Влияние глубины фокусировки на компенсацию аберраций при транскраниальном облучении головного мозга мощным фокусированным ультразвуком <i>Д.Д. Чупова, П.Б. Росницкий, В.А. Хохлова</i>	114
Характеризация поглощающего слоя с использованием акустической голографии <i>Д.А. Николаев, С.А. Цысарь, А.Д. Кренделева, О.А. Сапожников</i>	116

Эксперимент по выявлению модового состава прибрежного волновода на арктическом шельфе

К.В. Дмитриев, И.А. Панков, С.Н. Сергеев..... 121

Разделение мод морского волновода, образующегося на арктическом шельфе, методами шумовой интерферометрии

С.Н. Сергеев, А.С. Шуруп 123

Характеризация поглощающего слоя с использованием акустической голографии

Д.А. Николаев, С.А. Цысарь, А.Д. Кренделева, О.А. Сапожников

МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет

da.nikolaev@physics.msu.ru

В большинстве случаев применения ультразвука необходимо знать акустические характеристики среды распространения, такие как скорость звука и коэффициент поглощения в определенном диапазоне частот. По определению эти параметры относятся к задаче распространения плоской волны [1]. Большинство методов измерения таких характеристик используют плоские приемные и передающие излучатели [2]. Однако никакие реальные источники не излучают плоскую волну, вместо этого они генерируют ограниченные акустические пучки с гетерогенной пространственной структурой. Это делает акустические измерения в плосковолновом приближении неточными, а иногда даже невозможными, особенно в ближнем поле. Метод акустической голографии [3] может быть использован для реализации плосковолнового режима для передачи ультразвука через слой конечной апертуры.

Реальный ультразвуковой источник имеет сложную пространственную структуру, угловой спектр такого поля может быть определен из 2D голографического сканирования поля с помощью гидрофона малого размера. Угловой спектр волны [4] при распространении в воде на расстояние H изменяется согласно формуле (1). При распространении на такое же расстояние, в случае, если параллельно излучателю установлена пластинка толщиной h , угловой спектр изменяется согласно формуле (2).

$$S_1(k_x, k_y, \omega) = S_0(k_x, k_y, \omega) e^{iH \sqrt{(k_1 + i\alpha_1)^2 - k_x^2 - k_y^2}} \quad (1)$$

$$S_2(k_x, k_y, \omega) = S_0(k_x, k_y, \omega) e^{i(H-h) \sqrt{(k_1 + i\alpha_1)^2 - k_x^2 - k_y^2}} + ih \sqrt{(k_2 + i\alpha_2)^2 - k_x^2 \frac{c_2}{c_1} - k_y^2 \frac{c_2}{c_1}} T_{12} T_{21} \quad (2)$$

где S_0 – угловой спектр в некоторой плоскости Z , k_x, k_y – компоненты волнового вектора в воде вдоль осей x и y соответственно, ω – угловая частота волны, α_1, α_2 – коэффициенты поглощения волны в воде и исследуемой пластине соответственно для частоты ω , $k_1 = \frac{\omega}{c_1}, k_2 = \frac{\omega}{c_2}$ – волновые числа в воде и материале, c_1, c_2 – скорость звука в воде и в исследуемом материале, T_{12}, T_{21} – коэффициенты прохождения волны через границу раздела вода-пластина и пластина-вода.

В линейном режиме эти плоские волны распространяются через поглощающий слой независимо друг от друга. К тому же, для ограниченных акустических пучков такой слой конечной апертуры можно считать бесконечным в поперечном направлении. Следовательно, нормальное прохождение плоской волны через бесконечный слой может быть реализовано путём выделения перпендикулярной составляющей углового спектра реального волнового пучка.

Образец из мягкой резины был исследован в следующем эксперименте (рис.1). Широкополосный излучатель Panametric с резонансной частотой $f_0 = 1$ МГц, апертурой $D = 1.5''$ и фокусным расстоянием $F = 2.5''$ был помещен в предварительно дегазированную воду. Излучатель возбуждался коротким импульсом с частотой заполнения f_0 длиной 5 периодов. Спектр такого импульса является достаточно широким, что позволяет получать зависимости искомых параметров от частоты в широкой полосе при однократном измерении. Измерения проводились на параллельной излучателю плоскости размером $L_x = L_y = 75$ мм с помощью гидрофона Onda

HGL–0200 с диаметром чувствительного элемента 200 мкм. Гидрофон перемещался с помощью системы позиционирования Precision Acoustics UMS-3 в плоскости с шагом $dx = dy = 0.5$ мм. Плоскость измерения находилась между образцом и фокусом преобразователя на расстоянии $H = 45$ мм. Первое измерение голограммы проведено без исследуемого слоя, второе измерение проведено после установки слоя между излучателем и плоскостью измерения вдоль той же поверхности. Толщина слоя $h = 19.5$ мм.

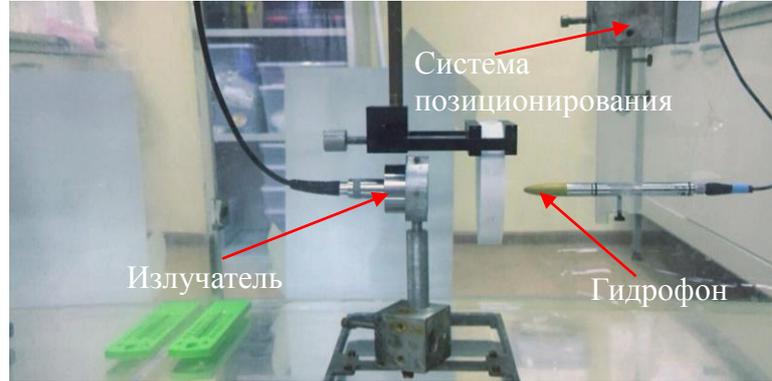


Рис. 1. Экспериментальная установка.

Из полученных измерений можно рассчитать угловой спектр двух голограмм и найти их отношение. Из формул (1), (2) это отношение имеет вид

$$\frac{S_2(k_x, k_y, \omega)}{S_1(k_x, k_y, \omega)} = e^{-ih\left(\sqrt{(k_1 + i\alpha_1)^2 - k_x^2 - k_y^2}\right) + ih\left(\sqrt{(k_2 + i\alpha_2)^2 - k_x^2 \frac{c_2}{c_1} - k_y^2 \frac{c_2}{c_1}}\right)} T_{12} T_{21} \quad (3)$$

Фаза соотношения (3) содержит информацию о скорости звука в материале слоя в диапазоне частот работы излучателя. Предполагая, что поглощение мало на масштабе длины волны, получим зависимость скорости звука в материале от частоты:

$$c_2(\omega) = \left(\left(\frac{\text{phase}(S_2(k_x, k_y, \omega)/S_1(k_x, k_y, \omega))}{h} + \sqrt{k(\omega)_2^2 - k_x^2 - k_y^2} \right)^2 + k_x^2 + k_y^2 \right)^{1/2} \quad (4)$$

Также с помощью фазы отношения (3) возможно определить компоненты k_x, k_y плоской волны, которая падает перпендикулярно исследуемому слою. Для такой волны $T_{12} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}, T_{21} = \frac{2Z_1}{Z_2 + Z_1}$, где Z_1, Z_2 – акустический импеданс воды и материала соответственно. Для такой волны фаза соотношения 3 принимает максимальное значение (см. рис.2а).

Модуль соотношения (3), представленный на рис. 2б, содержит информацию о коэффициенте поглощения волны в материале в зависимости от частоты. В приближении слабого поглощения из уравнения (3) получим зависимость поглощения от частоты:

$$\alpha_2(\omega) = \left(\frac{-\ln(\text{abs}(S_2(k_x, k_y, \omega)/S_1(k_x, k_y, \omega))) T_{12} T_{21}}{h} + \alpha_1(\omega) / \sqrt{1 - \frac{k_x^2 + k_y^2}{k_1^2}} \right) \sqrt{1 - \frac{k_x^2 + k_y^2}{k_2^2}} \quad (5)$$

Коэффициент поглощения и скорость звука рассчитаны для плоской волны, падающей перпендикулярно образцу. Для выделения перпендикулярной плоской волны на каждой частоте, такая волна находится сначала на основной частоте работы преобразователя f_0 , на основе этого значения вычисляются углы $\varphi_x = \frac{k_x}{k_1}, \varphi_y = \frac{k_y}{k_1}$, далее по этим значениям рассчитываются значения пространственных частот k_x, k_y

для остальных временных частот. В данном эксперименте расчет показал, что отклонение нормали резинового слоя от нормали плоскости голограммы равен $\varphi = 3^\circ$.

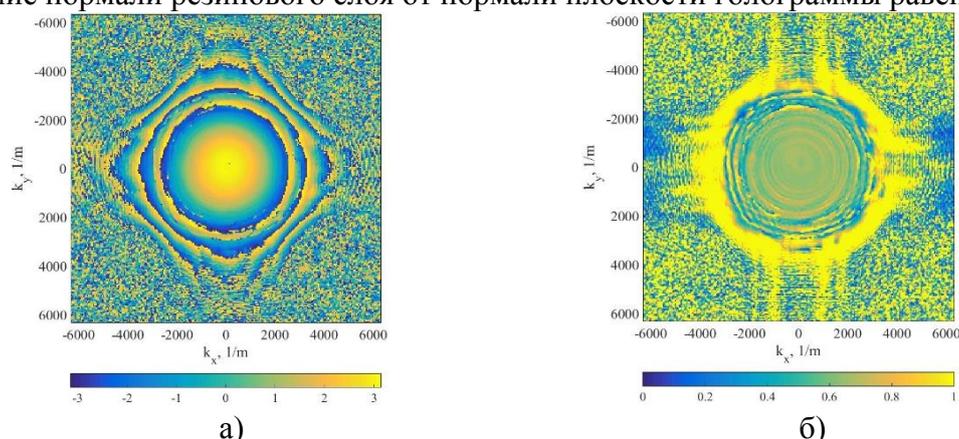


Рис. 2. Фаза (а) и амплитуда (б) отношения угловых спектров согласно соотношению (3), рассчитанных из голограмм, измеренных со слоем и без.

При известных акустических параметрах воды, измеренной методом замещения плотности материала слоя и рассчитанной по формуле (4) скорости звука в резине, возможно вычислить коэффициенты пропускания плоской волны T_{12} , T_{21} , падающей перпендикулярно на границу раздела. В работе рассмотрен случай однократного прохождения, импульс подобран таким образом, чтобы его длина была меньше удвоенной толщины слоя, следовательно, сигнал не перекрывался с отраженным от границ раздела. Из формул (4), (5) получены зависимости скорости звука и поглощения в исследуемом материале (рис. 3).

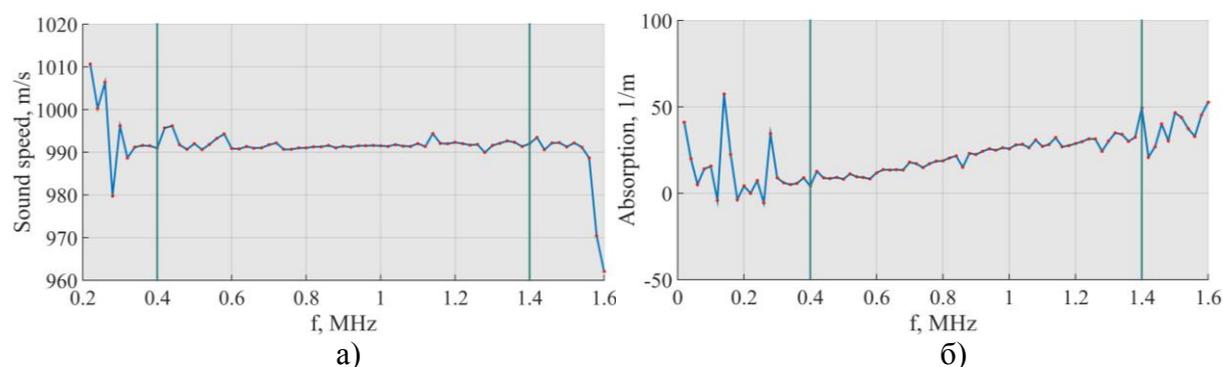


Рис. 3. Частотные зависимости скорости (а) и коэффициента поглощения (б) плоской акустической волны в исследуемом материале.

Вертикальными линиями на частотах 0.4 МГц и 1.4 МГц ограничена область, в которой измерения обладают достаточной точностью, вследствие наличия ненулевых компонент сигнала в этой спектральной области. На рис.4 изображены нормированные спектры плоской волны, падающей перпендикулярно образцу при наличии образца и без него. Вне этой границы, а также в областях около нулевых значений, спектральная мощность мала, и при расчете большое влияние оказывают шумы измерений. Ширину спектра можно увеличить, уменьшив длительность подаваемого импульса на излучатель, при этом уменьшается точность измерений, т.к. уменьшается спектральная мощность сигнала. При необходимости можно использовать другие излучатели с более высокой или низкой резонансной частотой или использовать усилители сигнала. Если необходимо точно получить акустические характеристики материала на одной частоте, можно провести измерения при работе излучателя в непрерывном режиме, в таком

случае будут получены наиболее точные результаты, но только для одной частоты, так как многократные переотражения в слое не позволят чётко разделить принимаемые спектральные компоненты

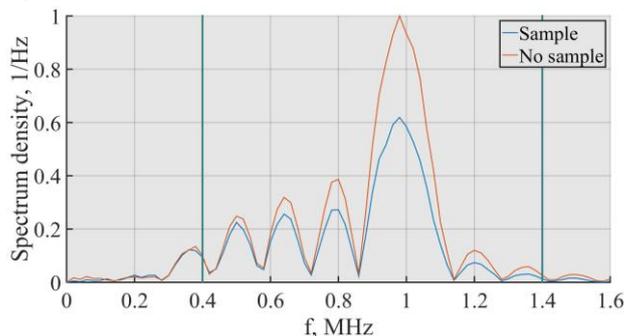


Рис. 4. Спектры плоской волны, перпендикулярной образцу при наличии образца (синяя линия) и без него (красная линия).

Для измерений был выбран фокусирующий излучатель, т.к. он обладает достаточно широким угловым спектром. На практике это означает, что можно найти такую угловую компоненту, которая будет падать перпендикулярно образцу даже при неизбежных отклонениях во взаимной ориентации излучателя и исследуемого слоя при их установке и при этом будет иметь достаточно большую спектральную мощность. Подбором апертуры и фокусного расстояния излучателя, а также выбором усилителя можно регулировать уровень ошибки измерений. При измерениях с плоским излучателем необходимо выставлять параллельность с высокой точностью, что не всегда возможно. Другое преимущество фокусирующего излучателя заключается в том, что при его использовании можно уменьшить размер голограммы, тем самым уменьшив время сканирования.

Для данного материала было проведено дополнительное измерение акустических свойств на частоте $f_0 = 1$ МГц следующим методом: образец известной толщины помещался между двумя преобразователями, один из которых возбуждался коротким импульсом, вторым преобразователем фиксировался прошедший сигнал, сравнивая этот сигнал со случаем без слоя, были вычислены скорость звука и поглощение на частоте заполнения импульса, подаваемого на преобразователь, получены следующие результаты: $c = 990 \pm 5$ м/с, $\alpha = 22.6 \pm 1.2$ м⁻¹. С помощью описанного в работе метода на данной частоте получены следующие значения: $c = 991.5 \pm 5$ м/с, $\alpha = 24.6 \pm 1.2$ м⁻¹.

В заключение можно отметить, что в ряде приложений ультразвука, в частности терапевтических, для увеличения эффективности и безопасности, для расчета количества энергии, доставляемой в область воздействия и т.д. необходимо точно знать свойства тканей, в том числе и их фантомов, через которые распространяется ультразвук. В данной работе представлен эффективный метод для измерения акустических характеристик различных материалов в широкой спектральной области. Работа поддержана грантом РФФИ 18-02-00991.

ЛИТЕРАТУРА

1. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. Теория Волн. М.:Наука 1977.
2. C.R. Hill, J.C. Bamber, G.R. ter Haar. Physical Principles of Medical Ultrasonics, John Wiley & Sons, March 2004

3. O.A. Sapozhnikov, S.A. Tsysar, V.A. Khokhlova, W. Kreider. Acoustic holography as a metrological tool for characterizing medical ultrasound sources and fields // Journal of the Acoustical Society of America. — 2015. — Vol. 138, no. 3. — P. 1515–1532.

4. Юлдашев П.В., Хохлова В.А. Моделирование трехмерных нелинейных полей ультразвуковых терапевтических решеток // Акуст. журн., 2011, Т. 57, № 3, с.337-347.