



УДК 535.241.13

Метод визуализации пространственно-неоднородных акустических полей от микрообъектов на основе акустооптического взаимодействия в системе с двойным преобразованием Фурье



Е. Л. Никишин, М. В. Павлова, А. В. Сучилин

Никишин Евгений Леонардович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., nikel-55@yandex.ru

Павлова Мария Валентиновна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., pavlovam@yandex.ru

Сучилин Алексей Владимирович, аспирант кафедры приборостроения, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., aleksey.such@yandex.ru

Представлен метод акустооптической визуализации на основе двойного преобразования Фурье. В гибридном акустооптическом процессоре двойное Фурье-преобразование реализуется в процессе преобразования акустического сигнала от объекта акустической линзой, образованной сопряженными сферическими поверхностями двух кристаллов, и последующей обработки дифрагированного в фотоупругой среде света оптической собирающей линзой. Рассмотрена возможность использования данного способа для отображения с высоким разрешением акустических полей от микрообъектов с характерными размерами десятки микрометров. Изучена зависимость разрешающей способности рассматриваемого устройства визуализации от параметров акустической и оптической систем, а также системы регистрации изображения. Представлена оптическая система ввода лазерного пучка, позволяющая одновременно улучшить разрешающую способность устройства и обеспечить наблюдение акустических полей в широком угловом спектре. Приведены формулы для теоретической оценки разрешающей способности компонентов акустооптического процессора. Показано, что для получения одинаковой разрешающей способности акустооптического процессора по ортогональным направлениям акустического объекта необходимо реализовать оптическую систему с угловым разрешением в плоскостях, соответствующих этим направлениям, равным отношению углового разрешения акустической линзы к коэффициенту анаморфирования. Проведена экспериментальная проверка работоспособности акустооптического процессора. Представлены теоретическая и экспериментальная оценка разрешающей способности устройства в целом.

Ключевые слова: визуализация, акустическое поле, акустооптическое взаимодействие, разрешающая способность.

DOI: <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2019-19-3-178-187>

Введение

Современные акустоэлектронные устройства выполняют разнообразные функции и находят применение для различных практи-

ческих приложений в дефектоскопии, материаловедении, биомедицине, электронике и др. [1–4]. При разработке ключевых элементов таких устройств (электроакустических преобразователей, фильтров, ячеек Брэгга, линий задержки, резонаторов [5–11]) особый интерес представляет исследование распределения пространственно-неоднородных акустических полей в этих объектах. Для изучения изменений пространственно-временной структуры акустического поля, вызванных распространением упругих колебаний в объекте, применяются различные методы визуализации и восстановления картины поля [12–18].

Одним из перспективных в этом отношении является акустооптический метод. Использование акустооптического метода визуализации, основанного на дифракции Брэгга, позволяет определять распределение акустического поля не только у поверхности, но и в объеме исследуемого объекта [19–21]. К сожалению, в основном полученные с помощью таких устройств изображения не являются стигматическими, что препятствует созданию систем визуализации с высоким разрешением.

Целью данной работы является рассмотрение акустооптического устройства визуализации акустических полей от микрообъектов свободного от указанного недостатка.

1. Акустооптический процессор с двойным преобразованием Фурье исследуемого сигнала

В предыдущих работах [22–24] авторами – сотрудниками научной группы профессора Ю. А. Зюрюкина – был предложен метод визуализации акустических полей с помощью гибридного акустооптического (АО) процессора с двойным Фурье-преобразованием анализируемого сигнала, позволяющий получить стигматическое изображение объекта. При использовании этого метода «оптический образ» акустического поля в объектной плоскости формируется в результате



брэгговской дифракции и двух последовательных Фурье-преобразований: отображаемого двумерного распределения акустического поля и когерентного светового поля, дифрагированного на ансамбле плоских акустических волн, соответствующих Фурье-образу акустического поля. Первое Фурье-преобразование осуществляется посредством акустической линзы, образованной сопряженными сферическими поверхностями двух кристаллов, соединенных с помощью тонкого слоя акустического клея. Второе Фурье-преобразование осуществляется оптической линзой объектива фотоприемника. Механизм формирования оптического изображения акустического объекта в такой системе визуализации рассмотрен в работе [25].

Каждой точке объектной плоскости, находящейся в передней фокальной плоскости акустической линзы, соответствует определенное направление волнового вектора плоской акустической волны, распространяющейся в фотоупругой среде за акустической линзой.

Для конкретной частоты ультразвука это направление, в конечном итоге, определяет и направление волнового вектора дифрагированной световой волны, формируемой в результате дифракции Брэгга лазерного пучка при его распространении в кристалле с фотоупругими свойствами. Таким образом, устанавливается взаимно однозначное соответствие между точками объектной плоскости и плоскости изображения в задней фокальной плоскости оптической линзы, осуществляющей Фурье-преобразование дифрагированного светового поля. Рис. 1 иллюстрирует взаимно однозначное соответствие между точками кривой А...В, представляющей собой участок сечения акустического конуса, образованного акустическими волновыми векторами, для которых выполняется условие Брэгга, объектной плоскостью I и кривой А'...В', являющейся участком сечения оптического конуса, образованного волновыми векторами дифрагированного света, плоскостью изображения.

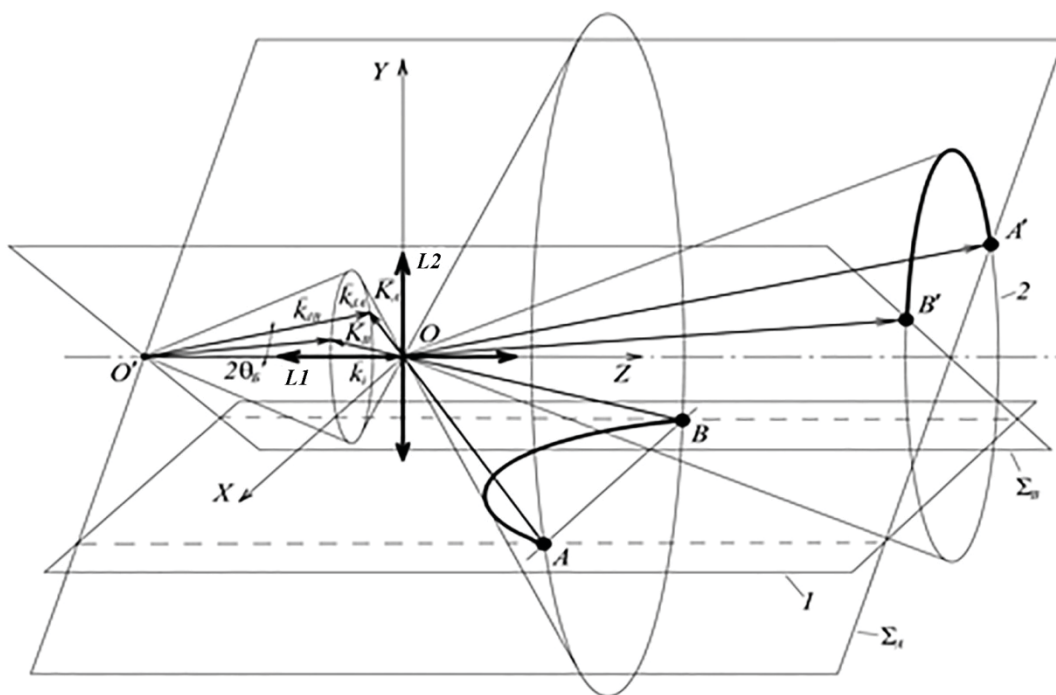


Рис. 1. Векторная схема гибридного акусто-оптического процессора, $\vec{k}_{dA}, \vec{k}_{dB}$ – волновые векторы дифрагированных световых волн для точек A и B соответственно, \vec{K}_A, \vec{K}_B – волновые векторы акустических волн от точек A и B , \vec{k}_i – волновой вектор падающей световой волны, $L1$ – акустическая линза, $L2$ – оптическая линза

Fig. 1. Vector scheme of the hybrid acousto-optic processor, $\vec{k}_{dA}, \vec{k}_{dB}$ – wave vectors of diffracted light waves for points A and B , respectively, \vec{K}_A, \vec{K}_B – wave vectors of acoustic waves from points A and B , \vec{k}_i – wave vector of incident light wave, $L1$ – acoustic lens, $L2$ – optical lens



Следует отметить, что вследствие присущего схеме преобразования анаморфирования система визуализации рассматриваемого типа не является изопланатичной. В работе [26] показано, что угловые размеры объекта вдоль кривой $A...B$ и его отображения отличаются на величину коэффициента анаморфирования μ . Величина анаморфирования зависит от параметров среды, в которой происходит акустооптическое взаимодействие, длины волны света, частоты акустической волны и определяется как

$$\mu = f\lambda/nv_2, \quad (1)$$

где f – частота акустической волны, λ – длина волны света в вакууме, n – показатель преломления световой волны в кристалле, в котором происходит акустооптическое взаимодействие, v_2 – скорость распространения акустической волны в этом кристалле.

Таким образом, угловой масштаб картины отображаемого акустического поля будет изменяться от 1 для направления вдоль оси координат Z (см. рис. 1) до величины μ для направления вдоль оси координат X .

2. Разрешающая способность АО процессора

Задача визуализации микрообъектов предъявляет повышенные требования к разрешающей способности устройства для ее осуществления. В АО устройстве визуализации носителем информации об объекте на начальном этапе являются акустические волны, а на заключительном – световые волны. Поэтому разрешающая способность АО процессора зависит и от разрешающей способности акустической линзы и от разрешения оптической системы устройства.

Поскольку разрешающая способность акустической линзы пропорциональна длине акустической волны, то для достижения высокого разрешения АО процессора целесообразно использовать акустические волны СВЧ диапазона на частотах 1 ГГц и выше, распространяющиеся в кристаллических средах с малым, в отличие от жидких сред, затуханием [27].

Теоретическая оценка разрешающей способности в настоящей работе дана в предположении слабой анизотропии кристаллов и относительно небольшого изменения углов распространения световых и акустических волн, при которых изменения скорости волн для разных углов считаются незначительными. При таком допущении угловое разрешение акустической линзы будет практически одинаковым в любом

направлении двумерного объекта визуализации и в соответствии с критерием Релея равно:

$$\psi_{min} = v_2/fH, \quad (2)$$

где H – апертура акустической линзы.

Другим компонентом АО процессора, от которого зависит разрешающая способность устройства, является его оптическая система. Анализ геометрии акустооптического взаимодействия в рассматриваемом способе визуализации показывает, что дифракция Брэгга на упругих волнах в угловом спектре некоторой ширины в плоскости XZ (см. рис. 1), перпендикулярной главной плоскости акустооптического взаимодействия, возможна благодаря дифракционной расходимости падающего пучка света без подстройки луча лазера [25]. Под главной плоскостью акустооптического взаимодействия будем понимать плоскость YZ , образованную направлением излучения лазера и главной осью сферической акустической линзы. В то время как для осуществления дифракции на упругих волнах в таком же угловом спектре в главной плоскости акустооптического взаимодействия дифракционной расходимости недостаточно и необходимо либо использовать клиновидный оптический пучок, либо обеспечить сканирование по углу падающего лазерного пучка.

Расширение углового спектра взаимодействия посредством изменения угла падения лазерного луча ухудшает быстродействие системы визуализации, а также предполагает наличие дополнительных систем управления лучом и обработки изображений. Использование расходящегося или сходящегося оптического пучка позволяет избежать отмеченных проблем, однако полученные изображения характеризуются чуть меньшей светосилой.

Система формирования падающего светового пучка, состоящая из цилиндрических линз, позволяет создать широкий лазерный пучок и добиться максимально возможной разрешающей способности АО процессора с кристаллами определенного размера [28]. Оптическая система, обеспечивающая рассмотренную геометрию акустооптического взаимодействия, представлена на рис. 2. Она содержит две цилиндрические линзы, оси которых лежат в главной плоскости акустооптического взаимодействия, и одну цилиндрическую линзу, ось которой перпендикулярна данной плоскости. Две первые линзы формируют в плоскости, перпендикулярной главной плоскости акустооптического взаимодействия, коллимированный пучок света шириной, равной размеру оптической грани ячейки Брэгга.

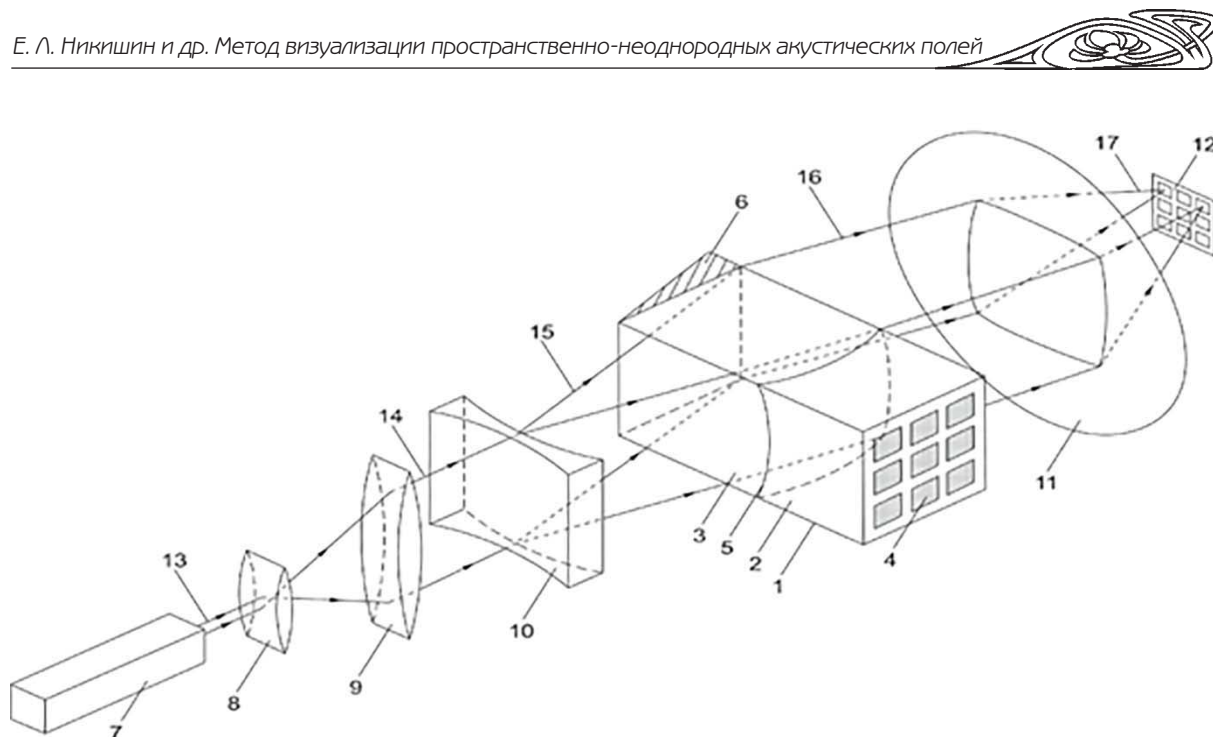


Рис. 2. Оптическая схема устройства визуализации: 1 – акустооптическая ячейка Брэгга, 2 – кристалл, на поверхности которого находится акустический объект 4, 3 – кристалл, в котором осуществляется акустооптическое взаимодействие, 5 – сопряженные сферические поверхности кристаллов, 6 – акустическая поглощающая нагрузка, 7 – источник когерентного оптического излучения, 8, 9 – цилиндрические линзы коллиматора, 10 – цилиндрическая линза с осью, перпендикулярной главной плоскости акустооптического взаимодействия, 11 – оптическая система обработки дифрагированного светового пучка, 12 – устройство регистрации изображения объекта, 13–17 – лучи лазера

Fig. 2. Optical scheme of the visualization device: 1 – acousto-optic Bragg cell, 2 – crystal with the acoustic object 4 on its surface, 3 – crystal in which acousto-optical interaction is carried out, 5 – conjugate spherical surfaces of crystals, 6 – acoustic absorbing load, 7 – source of coherent optical radiation, 8, 9 – cylindrical collimator lenses, 10 – cylindrical lens with an axis perpendicular to the main plane of acousto-optic interaction, 11 – of diffracted light beam processing, 12 – object image registration device, 13–17 – laser beams

Для достижения максимально возможной апертуры АО устройства, кроме широкого светового пучка, необходимо сформировать равный ему по ширине акустический пучок. Эта задача решается с помощью акустической линзы. Фокусное расстояние данной линзы определяется выражением

$$F_1 = |v_2 R / (v_1 - v_2)|, \quad (3)$$

где R – радиус кривизны сферических сопряженных торцевых поверхностей кристаллов, v_1 – скорость распространения упругой волны в первом кристалле, на поверхности которого расположен акустический объект.

Третья линза оптической системы создает в главной плоскости акустооптического взаимодействия клиновидный световой пучок. Её параметры выбираются из тех соображений, что максимальная разрешающая способность в главной плоскости акустооптического взаимодействия будет достигнута при выполнении двух условий [28]. Во-первых, фокусное расстояние этой линзы определяется выражением

$$F_3 = d/2 \cdot \operatorname{tg}[n \cdot \operatorname{arctg}(l/2[(v_1 - v_2)/v_2 R])], \quad (4)$$

И, во-вторых,

$$L = F_3(s \pm d)/d - l, \quad (5)$$

где L – расстояние от линзы до передней оптической грани ячейки Брэгга, F_3 – фокусное расстояние линзы, s – размер кристалла в направлении распространения упругой волны, d – поперечный размер луча лазера, l – размер кристалла ячейки Брэгга в направлении излучения лазера. Знак «+» в этом выражении используется при вычислении расстояния L для собирающей цилиндрической линзы, а знак «-» – если линза рассеивающая.

Реализация максимальной разрешающей способности АО процессора предполагает, что в главной плоскости акустооптического взаимодействия угловое разрешение оптической системы в фотоупругой среде должно быть не хуже углового разрешения акустической линзы. А в плоскости, перпендикулярной главной плоскости акустооптического взаимодействия, эта величина из-за эффекта анаморфирования должна быть в μ раз выше. Угловое разрешение оптической



системы в фотоупругой среде в соответствии с критерием Релея определяется выражением

$$\varphi_{min} = \lambda/nD, \quad (6)$$

где D – апертура АО процессора.

При этом минимальное расстояние между двумя различимыми точками в фокальной плоскости линзы системы обработки дифрагированного пучка определяется как

$$\Delta x = \lambda F_2/D, \quad (7)$$

где F_2 – фокусное расстояние собирающей линзы системы обработки изображения.

С помощью выражений (2), (6) и (7) были рассчитаны численные значения разрешения для конкретных параметров АО процессора, исследованного экспериментально. Если ширина коллимированного лазерного пучка равна 0.6 мм, то теоретическое значение разрешения оптической системы обработки с фокусным расстоянием 75 мм, которая использовалась в эксперименте, равно 79 мкм. С увеличением размера до 6 мм разрешение возрастает до 8 мкм. При такой апертуре угловое разрешение оптической системы в фотоупругой среде оказывается почти в μ раз выше углового разрешения акустической линзы апертурой 8 мм для волн на частоте 1.1 ГГц. В результате оптическая система практически не ограничивает разрешающую способность акустической линзы в плоскости, перпендикулярной главной плоскости акустооптического взаимодействия.

В общем случае при оценке влияния оптического компонента АО процессора на его разрешающую способность необходимо помнить о затухании упругих волн в процессе их распространения по фотоупругой среде, из-за которого разрешающая способность ухудшается. Тем не менее, выбор в качестве среды акустооптического взаимодействия кристаллов определенной ориентации с низким коэффициентом затухания упругих волн в СВЧ диапазоне при достаточно высоком коэффициенте акустооптического качества позволяет не учитывать это обстоятельство.

Третьим компонентом АО процессора, влияющим на разрешающую способность, является устройство регистрации изображения. В рассматриваемом процессоре используется ПЗС камера. Поэтому необходимо учесть также и влияние разрешения ПЗС матрицы.

Для определения приближенного значения разрешающей способности ПЗС камеры использовалась формула

$$\Delta x = km/NF_2, \quad (8)$$

где k – длина ПЗС матрицы m – расстояние между объективом и кристаллом, в котором происходит

акустооптическое взаимодействие, N – количество пикселей матрицы в направлении определения разрешающей способности, деленное на 2. Подстановка числовых значений указанных величин в выражение (8) дает разрешение ПЗС камеры 15 мкм.

Таким образом, сделанные теоретические оценки разрешающей способности компонентов АО процессора позволяют предположить возможность визуализации акустических объектов с характерными размерами до 15 мкм.

3. Экспериментальное исследование АО процессора

Экспериментальная проверка работоспособности АО процессора для визуализации микрообъектов и практическая оценка его разрешающей способности проводилась на макете, состоящем из кристаллов сапфира и ниобата лития. Разрешающая способность оценивалась в направлении, перпендикулярном главной плоскости акустооптического взаимодействия. Дифракция световых волн происходила в кристалле ниобата лития X -срезы, с оптической гранью, нормаль к которой повернута на 45° от оси Y к оси Z . В качестве источника когерентного света использовался He-Ne лазер с длиной волны 632.8 нм.

Объектом визуализации, излучающим продольные упругие волны, была система пьезоэлектрических элементов на основе оксида цинка с электродами в форме квадратов со стороной 70 мкм, расположенных в два ряда с периодом следования 200 мкм (рис. 3) на поверхности кристалла сапфира размерами 8×12 мм². Для формирования акустического поля от объекта визуализации на пьезопреобразователь подавался электромагнитный сигнал с частотой 1.1 ГГц и мощностью 0.5 Вт от генератора сигналов SG-8.

Полученная с помощью варифокального Фурье-преобразующего объектива (тип NATIONAL CCTV ZOOM LENS 12.5 – 75 mm (National, Japan)) цифровой системы ввода изображения VS-СТТ-075 (“НПК Видеоскан”, Россия) картина двух соседних излучающих элементов преобразователя представлена на рис. 4. Изображение фиксировалось на удалении 1 м от кристалла, в котором происходит акустооптическое взаимодействие.

При анализе полученной картины с помощью программы «ImageJ» были построены графики распределения яркости изображения излучающих элементов преобразователя в направлении, перпендикулярном главной плоскости акустооптического взаимодействия (рис. 5).

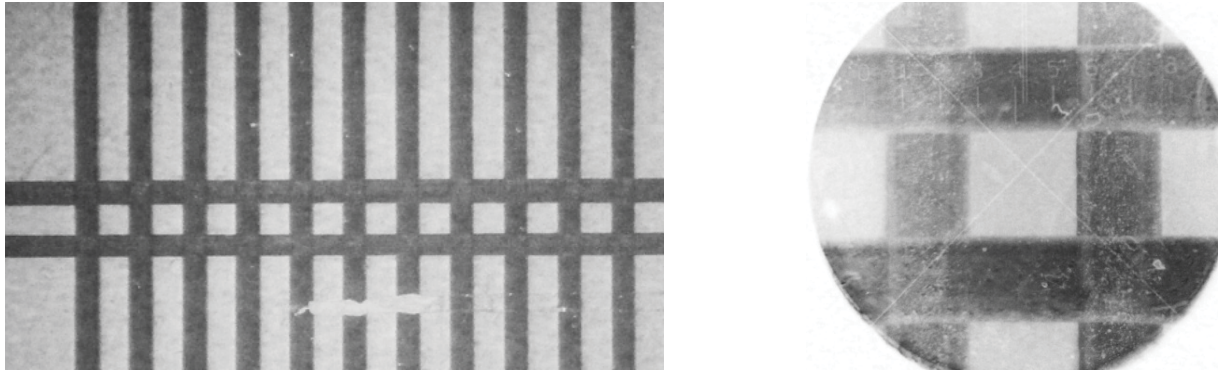


Рис. 3. Фотография системы излучателей многоэлементного преобразователя и ее увеличенный фрагмент
 Fig. 3. Photograph of the system of emitters of a multi-element transducer and its enlarged fragment

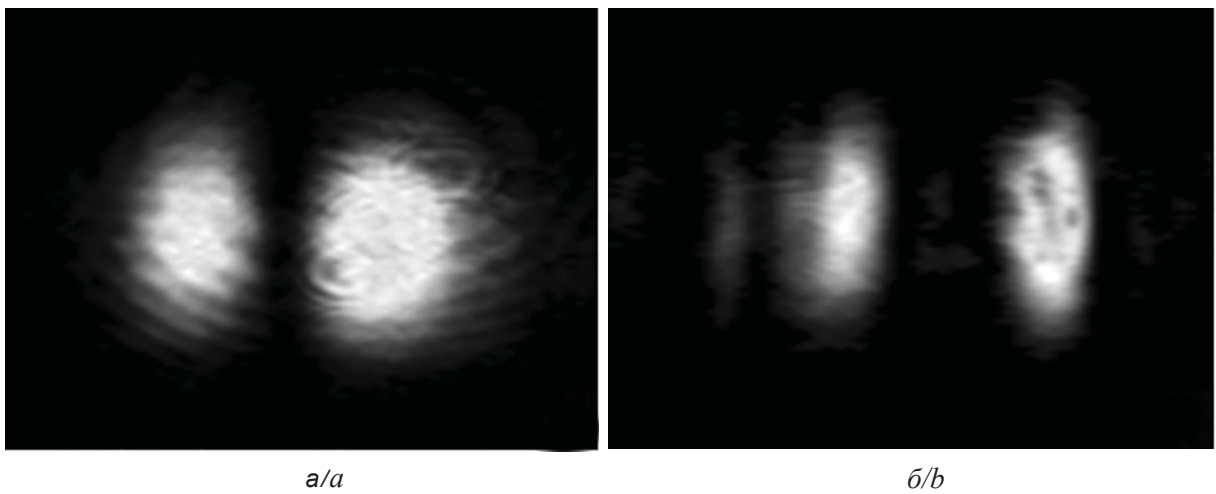


Рис. 4. Изображение излучающих элементов преобразователя при апертуре 0.6 мм (а) и 6 мм (б)
 Fig. 4. Image of the radiating elements of the transducer with an aperture of 0.6 mm (a) and 6 mm (b)

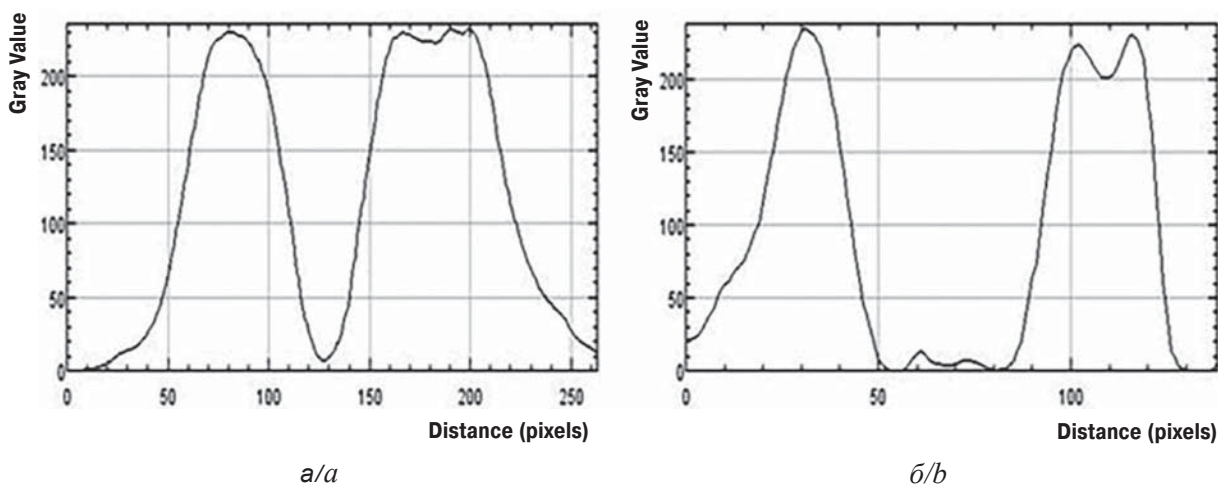


Рис. 5. Графики распределения интенсивности света в изображении излучающих элементов преобразователя при апертуре 0.6 мм (а) и 6 мм (б) в направлении, перпендикулярном главной плоскости акустооптического взаимодействия
 Fig. 5. Graphs of the intensity distribution of light in the image of the radiating elements of the transducer with an aperture of 0.6 mm (a) and 6 mm (b) in the direction perpendicular to the main plane of acousto-optical interaction



Оценка разрешающей способности устройства проводилась на основе полученных графиков путем сравнения отношения ширины излучающего элемента пьезоэлектрического преобразователя к периоду следования излучателей при различной ширине светового пучка.

Ширина излучателя на изображениях определялась по уровню падения интенсивности на 3дБ. Для апертуры 0.6 мм отношение ширины излучающего элемента преобразователя к периоду следования излучателей было равно 0.71, а для апертуры 6 мм оно составило 0.33 и оказалось близким к истинному значению 0.35, вычисленному исходя из геометрических параметров объекта визуализации.

Заключение

Полученные в работе результаты доказывают перспективность использования метода визуализации на основе акустооптического взаимодействия в системе с двойным преобразованием Фурье для наблюдения микрообъектов с высоким разрешением. При этом наиболее важными факторами, влияющими на разрешающую способность АО процессора, являются применение акустических волн СВЧ диапазона и широкая апертура устройства, обеспечиваемая оригинальной системой формирования падающего светового луча и акустической линзой с определенным фокусным расстоянием.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-07-00687).

Список литературы

1. Солдатов А. И., Селезнев А. И. Визуализация акустического поля в круглом волноводе // Изв. ЮФУ. Техн. науки. 2009. № 10. С. 173–178.
2. Благов А. Е., Даринский А. Н., Ковальчук М. В., Писаревский Ю. В., Просеков П. А., Таргонский А. В. Рентгеноакустические резонаторы для управления пространственными характеристиками рентгеновского излучения // Акустический журн. 2013. Т. 53, № 5. С. 561–568. DOI: 10.7868/S0320791913050031
3. Прохоров В. Е., Чашечкин Ю. Д. Визуализация и акустическая регистрация тонкой структуры стратифицированного течения за вертикальной пластиной // Механика жидкости и газа. 2013. № 6. С. 15–28.
4. Зимняков Д. А., Никишин Е. Л., Павлова М. В., Суцилин А. В. Акустооптический метод отображения распределения стоячих электромагнитных волн в

- многоэлементных пьезопреобразователях акустоэлектронных устройств // Приборы и техника эксперимента. 2014. № 6. С. 57–61.
5. Profunser D. M., Muramoto E., Matsuda O., Wright O. B., Lang U. Dynamic visualization of surface acoustic waves on a two-dimensional phononic crystal // Phys. Rev. B. 2009. Vol. 80. P. 014301. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.80.014301>
6. Алексеев С. Г., Гуляев Ю. В., Котелянский И. М., Мансфельд Г. Д. Некоторые тенденции развития акустоэлектроники сверхвысоких частот // УФН. 2005. Т. 175, № 8. С. 895–900.
7. Corso C. D., Dickherber A., Hunt W. D. Lateral field excitation of thickness shear mode waves in a thin film ZnO solidly mounted resonator // J. Appl. Phys. 2007. Vol. 101. P. 054514. DOI: 10.1063/1.2562040
8. Yoshino Y. Piezoelectric thin films and their applications for electronics // J. Appl. Phys. 2009. Vol. 105, iss. 6. P. 061623. DOI: 10.1063/1.3072691
9. Qin L., Chen Q., Cheng H., Chen Q., Li J.-F., Wang Q.-M. Viscosity sensor using ZnO and AlN thin film bulk acoustic resonators with tilted polar c-axis orientations // J. Appl. Phys. 2011. Vol. 110, iss. 9. P. 094511. DOI: 10.1063/1.3657781
10. Prasad M., Sahula V., Vinod Kumar K. V. ZnO etching and microtunnel fabrication for high-reliability MEMS acoustic sensor // IEEE Trans. on Device Mater. Reliability. 2014. Vol. 14, iss. 1. P. 545–554. DOI: 10.1109/TDMR.2013.2271245
11. Hickernell F. S. Zinc-Oxide Thin-Film Surface-Wave Transducers // Proceedings of the IEEE. 1976. Vol. 64, iss. 5. P. 631–635. DOI: 10.1109/PROC.1976.10187
12. Nalamwar A. L., Wagers R. S., Epstein M. Efficient bulk-wave excitation by interdigital transducers in layered media // J. Appl. Phys. 1977. Vol. 48, iss. 6. P. 2175–2178. DOI: 10.1063/1.324017
13. Jing B., Chigan P., Ge Z., Wu L., Wang S., Wan M. Visualizing the movement of the contact between vocal folds during vibration by using array-based transmission ultrasonic glottography // Journal of the Acoustical Society of America. 2017. Vol. 141, iss. 5. P. 3312–3322. DOI: 10.1121/1.4983472
14. Pudovikov S., Bulavinov A., Pinchuk R. Innovative Ultrasonic Testing (UT) of Nuclear Components by Sampling Phased Array with 3D Visualization of Inspection Results // DGZfP Proceedings 8th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurised Components 2010 (Berlin, Germany, 29.09.2010–1.10.2010). Berlin, 2011. Paper Th.2.C.6, 10 p.
15. Ohno M., Takagi K. Schlieren visualization of acoustic phase conjugate waves generated by nonlinear electroacoustic interaction in LiNbO₃ // Appl. Phys. Lett. 1992. Vol. 60, iss. 1. P. 29–31. DOI: 10.1063/1.107356
16. Hargather M. J., Settles G. S., Madalis M. J. Schlieren imaging of loud sounds and weak shock waves in air near the limit of visibility // Shock Waves. 2010. Vol. 20, iss. 1. P. 9–17. DOI: 10.1007/s00193-009-0226-6



17. Goh C. L., Rahim R. A., Rahiman H. F., Zhen Cong T., Wahad Y. A. Simulation and experimental study of the sensor emitting frequency for ultrasonic tomography system in a conducting pipe // *Flow Measurement and Instrumentation*. 2017. Vol. 54. P. 158–171. DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2017.01.003
18. Суханов Д. Я., Ерзакова Н. Н. Восстановление изображений звукоизлучающих объектов по многопозиционным широкополосным дистанционным измерениям звукового поля // *Изв. вузов. Физика*. 2013. Т. 56, № 8/2. С. 57–61.
19. Korpel A. Visualization of the cross-section of a sound beam by Bragg diffraction of light // *Appl. Phys. Lett.* 1966. Vol. 9. P. 425–427.
20. Ахмед М., Уэйд Г. Брэгговская акустоскопия // *Тр. Ин-та инженеров по электротехнике и радиоэлектронике*. 1979. Т. 67, вып. 4. С. 170–190.
21. Korpel A. *Acousto-optics*. N.Y. : Marcel Dekker Inc., 1997. 396 p.
22. Зюрюкин Ю. А., Колотырин А. А., Князев А. А. Принципы брэгговской акустооптической визуализации с двойным Фурье-преобразованием // *Проблемы оптической физики : материалы междунар. Молодежной науч. школы по оптике, лазерной физике и биофизике*. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2000. С. 163–164.
23. Колотырин А. А., Зимняков Д. А., Никишин Е. Л., Здражевский Р. А., Заварин С. В. Гибридный акустооптический Фурье-процессор для визуализации пространственно-неоднородных акустических полей // *Письма в ЖТФ*. 2011. Т. 37, вып. 21. С. 9–16.
24. Пат. 2470268 Рос. Федерация, МПК G01H 9/00. Устройство для визуализации пространственно-неоднородных акустических полей от микрообъектов / Зимняков Д. А., Колотырин А. А., Никишин Е. Л. Заявл. 01.07.2011 ; опубл. 20.12.2012, Бюл. № 35.
25. Колотырин А. А., Никишин Е. Л., Павлова М. В., Сучилин А. В. Анализ визуального отображения акустического объекта в гибридном акустооптическом процессоре // *Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2014 : материалы междунар. науч.-техн. конф.* Саратов : Изд-во СГТУ, 2014. Т. 1. С. 290–294. DOI: 10.1109/APEDE.2014.6958763
26. Никишин Е. Л., Павлова М. В., Сучилин А. В. Теоретическая и экспериментальная оценка коэффициента анаморфирования в гибридном акустооптическом устройстве визуализации акустических полей // *Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2016 : материалы междунар. науч.-техн. конф.* Саратов : Изд-во СГТУ, 2016. Т. 1. С. 427–431. DOI: 10.1109/APEDE.2016.7878923
27. Балакишиев В. И., Парыгин В. Н., Чирков Л. Е. *Физические основы акустооптики*. М. : Радио и связь, 1985. 280 с.
28. Пат. 2658585 Рос. Федерация, МПК G01H 9/00. Устройство для визуализации акустических полей от микрообъектов / Зимняков Д. А., Никишин Е. Л., Павлова М. В., Сучилин А. В. Заявл. 02.05.2017 ; опубл. 21.06.2018, Бюл. № 18.

Образец для цитирования:

Никишин Е. Л., Павлова М. В., Сучилин А. В. Метод визуализации пространственно-неоднородных акустических полей от микрообъектов на основе акустооптического взаимодействия в системе с двойным преобразованием Фурье // *Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика*. 2019. Т. 19, вып. 3. С. 178–187. DOI: <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2019-19-3-178-187>

The Method of Visualization of Spatially Inhomogeneous Acoustic Fields from Micro-Objects on the Basis of Acousto-Optic Interaction in the System with Double Fourier Transform

E. L. Nikishin, M. V. Pavlova, A. V. Suchilin

Evgeny L. Nikishin, <https://orcid.org/0000-0002-0067-8271>, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Politechnicheskaya St., Saratov 410054, Russia, nikel-55@yandex.ru

Maria V. Pavlova, <https://orcid.org/0000-0002-5565-1447>, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Politechnicheskaya St., Saratov 410054, Russia, pavlovam@yandex.ru

Aleksey V. Suchilin, <https://orcid.org/0000-0001-6748-065X>, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Politechnicheskaya St., Saratov 410054, Russia, aleksey.such@yandex.ru

Background and Objectives: The method of acousto-optic visualization based on a double Fourier transform is presented. In a

hybrid acousto-optic processor, the double Fourier transform is realized in the process of converting an acoustic signal from an object by an acoustic lens formed by the conjugate spherical surfaces of two crystals, and the subsequent processing of light diffracted in a photoelastic medium by an optical collecting lens. The possibility of using of this method for displaying high-resolution acoustic fields from micro-objects with characteristic dimensions of tens of micrometers is considered. The dependence of the resolution of the visualization device on the parameters of the acoustic and optical systems, as well as the image registration system, is studied. **Materials and Methods:** An optical system for introducing a laser beam is presented, which simultaneously improves the resolution of the device and ensures the observation of acoustic fields in a wide angular spectrum. Formulas for theoretical estimation of the resolution of components of an acousto-optic processor are presented. It is shown that to obtain the same resolution of the acousto-optic processor in orthogonal directions of an acoustic object, it is necessary to implement an optical system with an angular resolution in the planes corresponding to these directions, equal to the ratio of the angular resolution of the acoustic lens to the anamorphization coefficient. **Results:** The experimental verification of the acousto-optic processor



functionality is carried out. Theoretical and experimental estimations of the resolution of the device as a whole are given. **Conclusion:** The advantage of using the visualization method based on acousto-optic interaction in a double Fourier transform system for observing micro-objects with high resolution is proved.

Keywords: visualization, acoustic field, acousto-optic interaction, resolution.

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project No. 18-07-00687).

References

1. Soldatov A. I., Seleznev A. I. Acoustic Field Visualization in cylindrical waveguide. *Izvestiia IuFU. Tekhnicheskie nauki* [Journal of SFU. Technical science], 2009, no. 10, pp. 173–178 (in Russian).
2. Blagov A. E., Darinskii A. N., Targonskii A. V., Pisarevskii Yu. V., Prosekov P. A., Kovalchuk M. V. X-ray acoustic resonators for controlling the spatial characteristics of X-radiation. *Acoustical Physics*, 2013, vol. 59, no. 5, pp. 506–512. DOI: 10.1134/S1063771013050035
3. Prokhorov V. E., Chashechkin Y. D. Visualization and acoustic sounding of the fine structure of a stratified flow behind a vertical plate. *Fluid Dynamics*, 2013, vol. 48, no. 6, pp. 722–733.
4. Zimnyakov D. A., Nikishin E. L., Pavlova M. V., Suchilin A. V. Acousto-optical imaging of standing electromagnetic waves in multielement piezoelectric transducers of acoustoelectric devices. *Instruments and Experimental Techniques*, 2014, vol. 57, no. 6, pp. 702–705. DOI: 10.1134/S0020441214060128
5. Profunser D. M., Muramoto E., Matsuda O., Wright O. B., Lang U. Dynamic visualization of surface acoustic waves on a two-dimensional phononic crystal. *Phys. Rev. B*, 2009, vol. 80, p. 014301. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.80.014301>
6. Alekseev S. G., Gulyaev Yu. V., Kotelyanskii I. M., Mansfel'd G. D. Some trends in microwave acoustoelectronics development. *Physics-Uspekhi*, 2005, vol. 48, no. 8, pp. 855–859. DOI: 10.1070/PU2005v048n08A-BEH002841
7. Corso C. D., Dickherber A., Hunt W. D. Lateral field excitation of thickness shear mode waves in a thin film ZnO solidly mounted resonator. *J. Appl. Phys.*, 2007, vol. 101, pp. 054514. DOI: 10.1063/1.2562040
8. Yoshino Y. Piezoelectric thin films and their applications for electronics. *J. Appl. Phys.*, 2009, vol. 105, iss. 6, pp. 061623. DOI: 10.1063/1.3072691
9. Qin L., Chen Q., Cheng H., Chen Q., Li J.-F., Wang Q.-M. Viscosity sensor using ZnO and AlN thin film bulk acoustic resonators with tilted polar c-axis orientations. *J. Appl. Phys.*, 2011, vol. 110, iss. 9, pp. 094511. DOI: 10.1063/1.3657781
10. Prasad M., Sahula V., Vinod Kumar K. V. ZnO etching and microtunnel fabrication for high-reliability MEMS acoustic sensor. *IEEE Trans. on Device Mater. Reliability*, 2014, vol. 14, iss. 1, pp. 545–554. DOI: 10.1109/TDMR.2013.2271245
11. Hickernell F. S. Zinc-Oxide Thin-Film Surface-Wave Transducers. *Proceedings of the IEEE*, 1976, vol. 64, iss. 5, pp. 631–635. DOI: 10.1109/PROC.1976.10187
12. Nalamwar A. L., Wagers R. S., Epstein M. Efficient bulk-wave excitation by interdigital transducers in layered media. *J. Appl. Phys.*, 1977, vol. 48, iss. 6, pp. 2175–2178. DOI: 10.1063/1.324017
13. Jing B., Chigan P., Ge Z., Wu L., Wang S., Wan M. Visualizing the movement of the contact between vocal folds during vibration by using array-based transmission ultrasonic glottography. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2017, vol. 141, iss. 5, pp. 3312–3322. DOI: 10.1121/1.4983472
14. Pudovikov S., Bulavinov A., Pinchuk R. Innovative Ultrasonic Testing (UT) of Nuclear Components by Sampling Phased Array with 3D Visualization of Inspection Results. DGZFP Proceedings 8th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurised Components 2010 (Berlin, Germany, 29 September 2010 – 1 October 2010). Berlin, 2011. Paper Th.2.C.6, 10 p.
15. Ohno M., Takagi K. Schlieren visualization of acoustic phase conjugate waves generated by nonlinear electroacoustic interaction in LiNbO₃. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, vol. 60, iss. 1, pp. 29–31. DOI: 10.1063/1.107356
16. Hargather M. J., Settles G. S., Madalis M. J. Schlieren imaging of loud sounds and weak shock waves in air near the limit of visibility. *Shock Waves*, 2010, vol. 20, iss. 1, February, pp. 9–17. DOI: 10.1007/s00193-009-0226-6
17. Goh C. L., Rahim R. A., Rahiman H. F., Zhen Cong T., Wahad Y. A. Simulation and experimental study of the sensor emitting frequency for ultrasonic tomography system in a conducting pipe. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2017, vol. 54, pp. 158–171. DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2017.01.003
18. Sukhanov D. Y., Yezakova N. N. Reconstruction of sound sources using multiposition wideband remote measurements of the sound field. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Fizika* [News from Universities. Physics], 2013, vol. 56, no. 8/2, pp. 57–61 (in Russian).
19. Korpel A. Visualization of the cross-section of a sound beam by Bragg diffraction of light. *Appl. Phys. Lett.*, 1966, vol. 9, pp. 425–427.
20. Ahmed M., Wade G. Breggovskaia akustoskopiiia [Bragg Acoustoscopy]. *Trudy instituta inzhenerov po elektrotekhnike i radioelektronike* [Proc. of the IEEE], 1979, vol. 67, iss. 4, pp. 170–190 (in Russian).
21. Korpel A. *Acousto-optics*. New York, Marcel Dekker Inc., 1997. 396 p.
22. Zyuryukin Yu. A., Kolotyryn A. A., Knyazev A. A. Principles of Bragg Acousto-Optic Visualization with Double Fourier Transform. In: *Problemy opticheskoi fiziki: materialy mezhdunar. Molodezhnoi nauch. shkoly po optike, lazernoj fizike i biofizike* [Problems of optical



- physics: materials of the Intern. youth scientific schools on optics, laser physics and biophysics]. Saratov, Izd-vo Sarat. un-ta, 2000, pp. 163–164 (in Russian).
23. Kolotyryn A. A., Zimnyakov D. A., Nikishin E. L., Zdravzhetskii R. A., Zavarin S. V. Hybrid Acousto-Optic Fourier Processor for Imaging Spatially Inhomogeneous Acoustic Fields. *Technical Physics Letters*, 2011, vol. 37, iss. 11, pp. 992–995. DOI: 10.1134/S106378501111006X
24. Zimnyakov D. A., Kolotyryn A. A., Nikishin E. L. *Ustroistvo dlia vizualizatsii prostranstvenno-neodnorodnykh akusticheskikh polei ot mikroob"ektov* [Device for visualization of space-inhomogeneous acoustic fields from micro-objects]. Patent RF, no. 2470268, 2012 (in Russian).
25. Kolotyryn A. A., Nikishin E. L., Pavlova M. V., Suchilin A. V. The analysis obtaining of optical image acoustic object by hybrid acousto-optic fourier processor. *International conference on actual problems of electron devices engineering APEDE-2014*. Saratov, Izd-vo SGTU, vol. 1, pp. 290–294 (in Russian). DOI: 10.1109/APEDE.2014.6958763
26. Nikishin E. L., Pavlova M. V., Suchilin A. V. Theoretical and experimental evaluation anamorphic factor in the hybrid acousto-optical imaging device acoustic fields. *International conference on actual problems of electron devices engineering, APEDE, 2017*, vol. 1, pp. 7878923. DOI: 10.1109/APEDE.2016.7878923
27. Balakshii V. I., Parygin V. N., Chirkov L. E. *Fizicheskiye osnovy akustooptiki* [Physical Basics of Acousto-Optics]. Moscow, Radio i Sviaz', 1985. 280 p. (in Russian).
28. Zimnyakov D. A., Nikishin E. L., Pavlova M. V., Suchilin A. V. *Ustroistvo dlia vizualizatsii akusticheskikh polei ot mikroob"ektov* [Device for visualization of acoustic fields from micro-objects]. Patent RF, no. 2658585, 2018 (in Russian).

Cite this article as:

Nikishin E. L., Pavlova M. V., Suchilin A. V. The Method of Visualization of Spatially Inhomogeneous Acoustic Fields from Micro-Objects on the Basis of Acousto-Optic Interaction in the System with Double Fourier Transform. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Physics*, 2019, vol. 19, iss. 3, pp. 178–187 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2019-19-3-178-187>
