
ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 535.241.13
DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-1-56-62

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ СТИГМАТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА В АКУСТООПТИЧЕСКОМ УСТРОЙСТВЕ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

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

*Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А., 410054, Саратов, Россия
E-mail: nikel55@yandex.ru*

Рассмотрен метод акустооптической визуализации пространственно-неоднородных акустических полей, формируемых микрообъектом. Данный метод базируется на брэгговской дифракции в системе с двойным преобразованием Фурье. Среди преимуществ устройства, реализующего данный метод, отмечается высокая разрешающая способность. Аналитически показано, что по сравнению с хорошо известной техникой визуализации А. Корпела изображения акустических микрообъектов, получаемые с помощью приборов на основе предлагаемого метода, свободны от астигматизма. В результате теоретического анализа механизма действия данного устройства получены уравнения для расчета геометрических параметров оптического изображения акустического микрообъекта.

Ключевые слова: визуализация, акустооптическое взаимодействие, дифракция Брэгга, акустическое поле, стигматическое изображение, преобразование Фурье

Введение. Акустооптическое устройство визуализации полей, формируемых акустическими микрообъектами, на основе двойного преобразования Фурье [1—3] обладает рядом неоспоримых преимуществ по сравнению с традиционными акустооптическими устройствами визуализации [4—8]. В первую очередь, это возможность разработки прибора с более высокой разрешающей способностью, что важно для качественного отображения акустических микрообъектов. Высокая разрешающая способность системы обусловлена использованием в качестве носителя информации об исследуемом объекте упругих волн СВЧ-диапазона с длиной волны порядка нескольких микрометров [9]. Такая возможность появилась благодаря использованию выполняющих функцию фотоупругой среды кристаллических материалов с низким, в отличие от традиционно применяемых жидких сред, поглощением упругих волн. Еще одним фактором, позволяющим увеличить разрешающую способность предлагаемого устройства с двойным фурье-преобразованием, является возможность использования в нем оптических пучков с большой апертурой, ограниченной только размерами кристаллов [10].

Другое, не менее важное, преимущество систем визуализации с двойным преобразованием Фурье — формирование ими стигматического изображения исследуемого акустического объекта. Методика построения такого изображения и рассматривается в настоящей статье.

Схема устройства визуализации. Схема предлагаемого устройства визуализации показана на рис. 1, где 1 — акустооптическая ячейка Брэгга; 2 — кристалл, на поверхности которого расположен акустический объект 4; 3 — кристалл, в котором осуществляется акустооп-

тическое 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 — система регистрации изображения объекта; 13—17 — лучи лазера. На рисунке отмечена также система координатных осей x, y, z , относительно которой будем указывать направление распространения оптических и акустических волн в устройстве визуализации при дальнейшем анализе его работы.

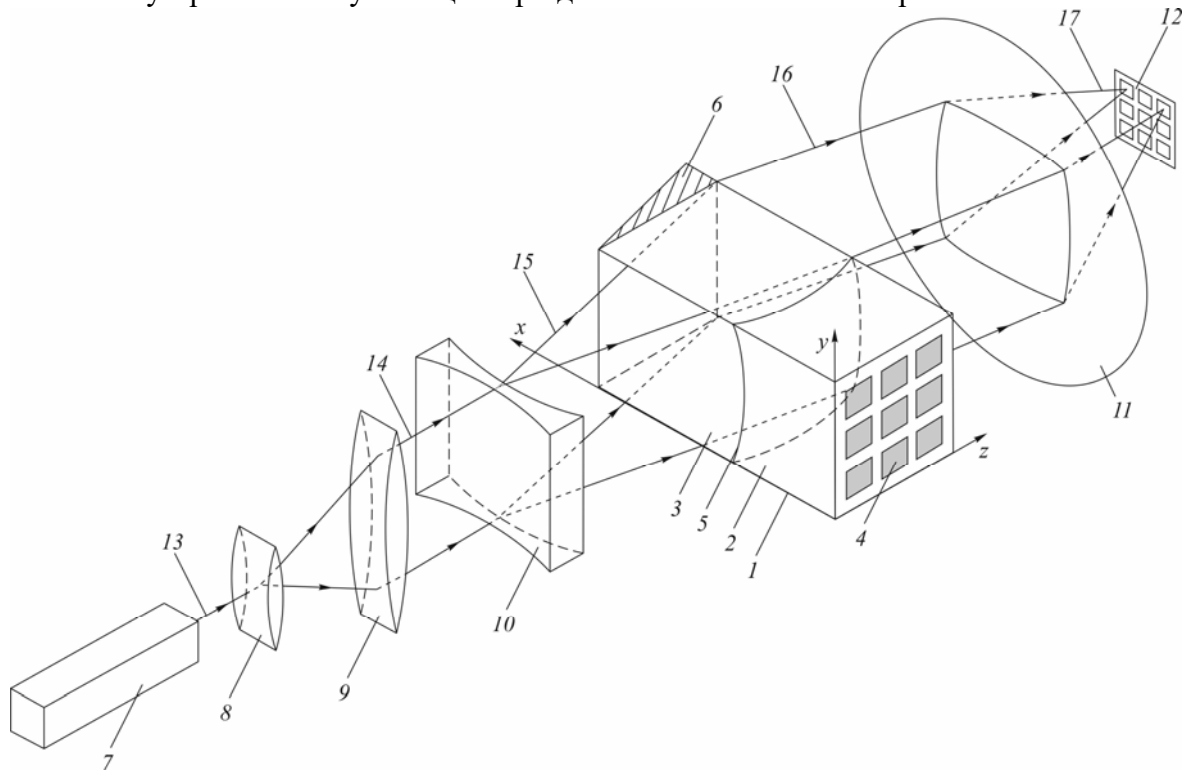


Рис. 1

В рассматриваемом акустооптическом устройстве визуализации двойное фурье-преобразование реализуется в процессе преобразования сферической акустической линзой акустического сигнала от объекта, а также путем последующей обработки оптической собирающей линзой дифрагированного в фотоупругой среде света от источника когерентного излучения [2]. Для иллюстрации этого механизма на рис. 2 представлена упрощенная оптическая схема прибора в проекции на плоскость xz ; обозначения элементов соответствует принятым на рис. 1, дополнительно обозначены: 18, 19 — две произвольные точки исследуемого объекта, 20, 21 — изображения этих точек.

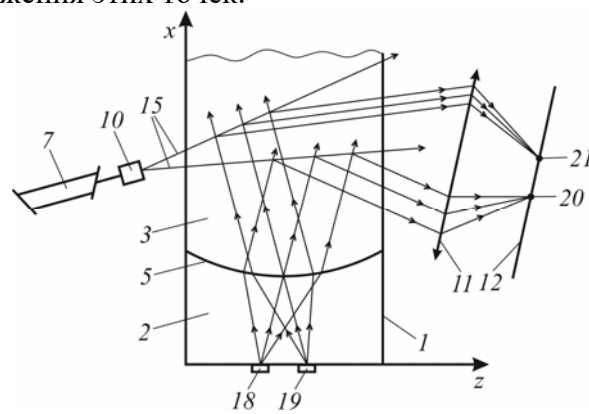


Рис. 2

Анализ изображения точки. Теоретический анализ процесса формирования изображения рассматриваемым устройством целесообразно проводить в пространстве волновых векторов, поскольку схема волновых векторов не имеет жесткой привязки к точкам реального пространства взаимодействия электромагнитной (оптической) и звуковой волн и может быть перенесена в любое его место. Оптическая схема устройства визуализации в пространстве волновых векторов представлена на рис. 3, где показаны акустическая $L1$ и оптическая $L2$ сферические линзы, которые расположены на расстояниях, равных фокусным, от предметной плоскости 1 и плоскости регистрации изображения 2 соответственно. Геометрические центры обеих линз в пространстве волновых векторов совпадают и расположены в начале системы координат O .

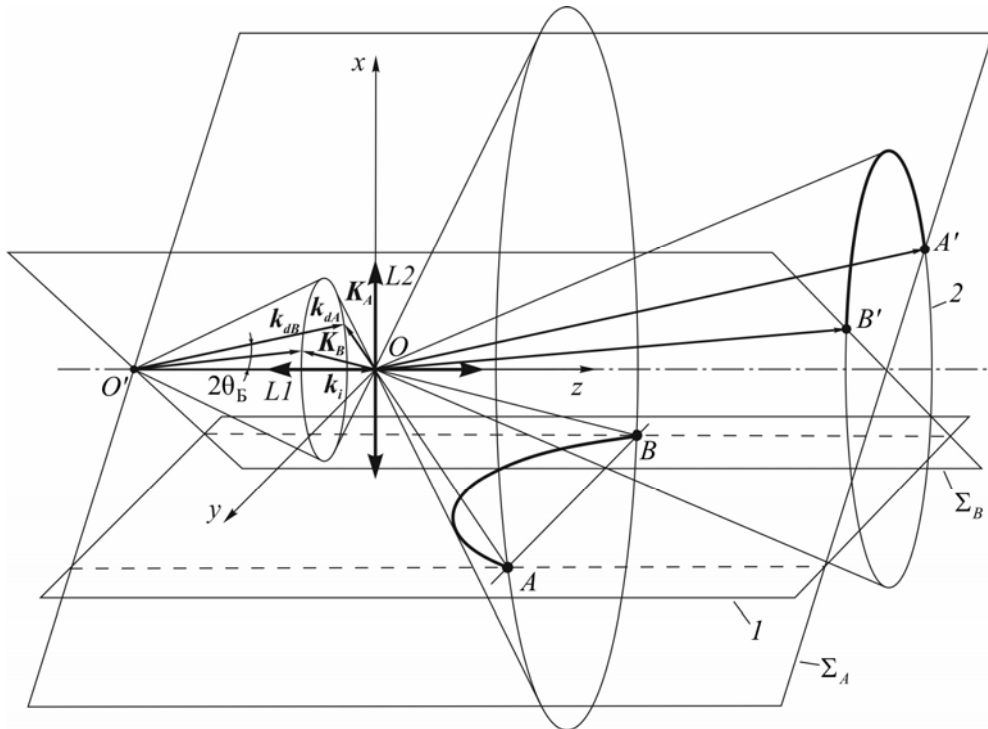


Рис. 3

Рассмотрим произвольную точку A предметной плоскости 1 . Эта точка как элемент акустического объекта порождает множество волновых векторов, имеющих всевозможные направления. На рисунке показано одно из таких возможных направлений AO , при распространении вдоль которого луч, как известно [11], не преломляется. После прохождения линзы $L1$ множество акустических волновых векторов из точки A преобразуется в единый вектор K_A , соответствующий квазиплоской акустической волне. Аналогично каждой точке предметной плоскости можно поставить в соответствие свой волновой вектор квазиплоской акустической волны. Таким образом, реализуется преобразование Фурье координатного пространства акустического объекта в пространство волновых векторов плоских акустических волн.

Приведенные рассуждения справедливы, естественно, с позиций геометрической оптики [12]. Частично это допущение можно снять путем рассмотрения дифракционного уширения и расчета изображения при выбранных параметрах радиуса пятна Эйри. Кроме того, в данной работе предполагается использование кристаллов со слабой анизотропией и относительно небольшое изменение углов распространения световых и акустических волн, при которых вариация их скорости при разных направлениях распространения считается незначительной [13].

В основу построения изображения положено взаимодействие световых лучей с упругими волнами в СВЧ-диапазоне, происходящее лишь при выполнении условия Брэгга [14—16]:

$$\sin \theta_B = \frac{\lambda}{2\Lambda}, \quad (1)$$

где θ_B — угол между падающим лучом света и фронтом упругой волны; λ — длина волны света в среде взаимодействия; Λ — длина акустической волны.

Заметим, что именно из-за требования по выполнению данного условия для наблюдения за акустическим объектом, имеющим конечные геометрические размеры, необходимо использовать расходящийся (или сходящийся) оптический пучок.

Выберем среди всех лучей падающего на кристалл расходящегося лазерного пучка тот, которому соответствует волновой вектор k_i , образующий угол $(\pi/2 + \theta_B)$ с вектором K_A . На рис. 3 направление вектора k_i совпадает с осью z . В результате брэгговской дифракции в пространстве векторов возникает вектор дифрагированного света k_{dA} . Вместе с тем луч света с волновым вектором k_i будет взаимодействовать и с другими акустическими волнами, удовлетворяющими условию Брэгга. Рассмотрим треугольник, составленный из векторов k_i , k_{dA} , K_A . Для того чтобы определить множество квазиплоских акустических волн и соответствующих им точек предметной плоскости, с которыми взаимодействует световой луч с волновым вектором k_i , будем поворачивать этот треугольник вокруг вектора k_i , т.е. вокруг оси z . Например, при повороте на некоторый угол получим новый треугольник, составленный из векторов k_i , k_{dB} , K_B . Вектор k_{dB} обусловлен акустооптическим взаимодействием с квазиплоской акустической волной с вектором K_B и соответствует новой точке B на предметной плоскости.

Анализ изображения объекта. Множество волновых векторов K акустического поля при повороте выделенного треугольника между положениями K_A и K_B образует фрагмент конической поверхности, соответствующий кривой $A...B$ на предметной плоскости. Вид кривой $A...B$ определяется линией пересечения предметной плоскости и конуса с вершиной в точке O , образующие которого являются продолжением конической поверхности, сформированной векторами K при повороте выделенного треугольника вокруг оси z на угол 2π рад. Учитывая, что расстояние от линзы $L1$ до предметной плоскости известно, можно аналитически найти вид кривой $A...B$.

Рассмотрим конус, образованный волновыми векторами дифрагированных световых волн. Векторы k_{dA} и k_{dB} , являющиеся результатом акустооптического взаимодействия светового луча с волновым вектором k_i на упругих волнах, идущих от точек A и B , служат образующими этого конуса, вершина которого расположена (см. рис. 3) в точке O' . Для удобства дальнейшего анализа сдвинем вершину вдоль оси z в точку O , находящуюся на фокусном расстоянии оптической линзы от плоскости регистрации 2. После прохождения дифрагированного света через линзу $L2$ каждый из вышеуказанных векторов конуса, соответствующий плоской волне дифрагированного света, может быть представлен в виде определенной точки на плоскости регистрации. Линза $L2$ выполняет обратное преобразование Фурье. В результате световая волна с вектором k_{dA} трансформируется в точку A' , а волна с вектором k_{dB} — в точку B' . Таким образом, на плоскости регистрации получаем точки A' и B' как изображения точек A и B предметной плоскости. Тройки векторов k_i , k_d , K определяют плоскости Σ акустооптического взаимодействия различных векторов акустических волн, в которых лежат соответствующие точки предметной плоскости и их изображения в плоскости регистрации. Так, точки A , O и A' принадлежат плоскости Σ_A , а точки B , O и B' — плоскости Σ_B .

Рассуждая подобным образом относительно всех точек кривой $A...B$, можно определить геометрическое место точек A' , B' в плоскости регистрации, представляющее изображение кривой $A...B$ предметной плоскости. Очевидно, что аналитический вид кривой $A'...B'$ можно получить как пересечение оптического конуса дифрагированного света с вершиной в точке O с плоскостью регистрации 2.

Для отображения точек предметной плоскости, не лежащих на кривой $A...B$, в силу необходимости выполнения условия Брэгга следует использовать другой луч падающего расходящегося оптического пучка когерентного света, соответствующий вектору k_i' , повернутому в плоскости xz на некоторый угол φ относительно оси z . Повторив всю цепочку рассуждений, получим две новые кривые на предметной плоскости и на плоскости регистрации. Аналитический расчет изменится лишь в том, что ось рассматриваемых конусов будет также повернута в выбранной системе координат и будет совпадать по направлению с вектором k_i' . Изменение угла падающего луча света в некотором диапазоне позволяет просканировать всю предметную плоскость, и если совокупность ряда ее точек составляет акустическую картину объекта, то в плоскости регистрации проявляется его оптическое изображение.

Математическая модель процесса визуализации. Приведенные выше рассуждения лежат в основе построения математической модели процесса получения изображения посредством устройства визуализации с двойным преобразованием Фурье. Запишем необходимые соотношения.

Уравнение акустического конуса с учетом возможности поворота его оси в плоскости xz на угол φ имеет следующий вид:

$$y_1^2 + (x_1 \cos \varphi - z_1 \sin \varphi)^2 = (x_1 \sin \varphi + z_1 \cos \varphi)^2 (\text{ctg} \theta_B)^2, \quad (2)$$

где x_1, y_1, z_1 — координаты точек, принадлежащих акустическому конусу.

Уравнение оптического конуса имеет вид

$$y_2^2 + (x_2 \cos \varphi - z_2 \sin \varphi)^2 = (x_2 \sin \varphi + z_2 \cos \varphi)^2 (\text{tg} \theta_B)^2, \quad (3)$$

где x_2, y_2, z_2 — координаты точек, принадлежащих оптическому конусу.

Уравнение плоскости Σ акустооптического взаимодействия, в которой лежат точки x_1, y_1, z_1 , точки x_2, y_2, z_2 и ось симметрии конусов, повернутая в плоскости xz на угол φ относительно оси z , задается выражением

$$\frac{y_2}{y_1} - \frac{x_2 \cos \varphi - z_2 \sin \varphi}{x_1 \cos \varphi - z_1 \sin \varphi} = 0. \quad (4)$$

Уравнения фокальных плоскостей акустической и оптической линз имеют соответственно следующий вид:

$$x_1 = -F_1, \quad z_2 = F_2. \quad (5)$$

Преобразуем выражение (2) с учетом (5) и получим трансцендентное уравнение относительно неизвестной величины φ :

$$y_1^2 + (F_1 \cos \varphi + z_1 \sin \varphi)^2 = (z_1 \cos \varphi - F_1 \sin \varphi)^2 (\text{ctg} \theta_B)^2. \quad (6)$$

Параметрами этого уравнения являются координаты y_1 и z_1 объекта в предметной плоскости.

Решение уравнения (6) позволяет найти угол φ , при котором заданная точка объекта будет отображаться на плоскости регистрации. Используя полученное решение и уравнения (3) и (4), можно определить координаты x_2, y_2 точки изображения на плоскости регистрации, когда $z_2 = F_2$.

Заключение. В результате проведенного анализа на примере получения изображения точки и семейства линий, принадлежащих поверхности исследуемого объекта, показана возможность получения стигматического визуального изображения акустических микрообъектов посредством устройства акустооптической визуализации, основанного на дифракции Брэгга в системе с двойным преобразованием Фурье. Полученные математические выражения

позволяют теоретически устанавливать однозначное соответствие между точками акустического объекта и точками его изображения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 18-07-00687).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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, 2000. С. 163—164.
2. Пат. 2470268 РФ, МПК G01H 9/00. Устройство для визуализации пространственно-неоднородных акустических полей от микрообъектов / Д. А. Зимняков, А. А. Колотырин, Е. Л. Никишин. Заявл. 01.07.2011; опубл. 20.12.2012. Бюл. № 35.
3. 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.
4. 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.
5. Pat. 3831135 USA. Optical Imaging of Sound Fields by Heterodyning / R. A. Smith. Publ. 20.08.1974.
6. Ахмед М., Уэйн Г. Брэгговская акустоскопия // ТИИЭР. 1979. Т. 67, вып. 4. С. 170—190.
7. Korpel A. Acousto-optics. N.Y.: Marcel Dekker Inc., 1997. 396 p.
8. Кайно Г. Акустические волны: Устройства, визуализация и аналоговая обработка сигналов: Пер. с англ. М.: Мир, 1990. 656 с.
9. 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. Сарат. ун-та. Серия „Физика“. 2019. Т. 19, вып. 3. С. 178—187. DOI: <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2019-19-3-178-187>.
10. Пат. 2658585 РФ, МПК G01H 9/00. Устройство для визуализации акустических полей от микрообъектов / Д. А. Зимняков, Е. Л. Никишин, М. В. Павлова, А. В. Сучилин. Заявл. 02.05.2017; опубл. 21.06.2018. Бюл. № 18.
11. Матвеев А. Н. Оптика. М.: Высш. школа, 1985. 351 с.
12. Дубовик А. С., Апенко Г. В., Дурейко Г. В. и др. Прикладная оптика / Под ред. А. С. Дубовика. М.: Недра, 1982. 612 с.
13. Блистанов А. А., Бондаренко В. С., Переломова Н. В. и др. Акустические кристаллы: Справочник / Под ред. М. П. Шаскольской. М.: Наука, 1982. 632 с.
14. Gordon E. I. A review of acoustooptical deflection and modulation devices / Proc. IEEE. 1966. Vol. 54, N 10. P. 1391.
15. Магдич Л. Н., Молчанов В. Я. Акустооптические устройства и их применение. М.: Сов. радио, 1978. 112 с.
16. Балакий В. И., Парыгин В. Н., Чирков Л. Е. Физические основы акустооптики. М.: Радио и связь, 1985. 280 с.

Сведения об авторах

- | | |
|-------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Алексей Владимирович Сучилин | — аспирант; СГТУ им. Гагарина Ю. А., кафедра физики; E-mail: aleksey.such@yandex.ru |
| Евгений Леонардович Никишин | — канд. физ.-мат. наук, доцент; СГТУ им. Гагарина Ю. А., кафедра физики; E-mail: nikiel55@yandex.ru |
| Мария Валентиновна Павлова | — канд. физ.-мат. наук, доцент; СГТУ им. Гагарина Ю. А., кафедра физики; E-mail: pavlovam@yandex.ru |

Поступила в редакцию
02.09.2020 г.

Ссылка для цитирования: Сучилин А. В., Никишин Е. Л., Павлова М. В. Моделирование процесса получения стигматического изображения акустического объекта в акустооптическом устройстве визуализации // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 1. С. 56—62.

MODELING THE PROCESS OF OBTAINING A STIGMATIC IMAGE OF AN ACOUSTIC OBJECT IN AN ACOUSTO-OPTIC VISUALIZATION DEVICE

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

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 410054, Saratov, Russia
E-mail: nikel55@yandex.ru

A method of acousto-optic visualization of spatially inhomogeneous acoustic fields formed by acoustic object is considered. This method is based on Bragg diffraction in a system with a double Fourier transform. Among the advantages of the device that implements this method, there is a high resolution. It is shown analytically that, in contrast to the well-known visualization technique by A. Korpel, the images of acoustic micro-objects obtained with using the proposed a device, are free from astigmatism. As a result of theoretical analysis of the device operation mechanism, equations for calculating the geometric parameters of optical image of acoustic micro-object are derived.

Keywords: visualization, acoustic-optical interaction, Bragg diffraction, acoustic field, stigmatic image, Fourier transform

REFERENCES

1. Zyuryukin Yu.A., Kolotyryn A.A., Knyazev A.A. *Problemy opticheskoy fiziki* (Problems of Optical Physics), Materials of the International Youth Scientific School on Optics, Laser Physics and Biophysics, Saratov, 2000, pp. 163–164. (in Russ.)
2. Patent RU 2470268, G01H 9/00, *Ustroystvo dlya vizualizatsii prostranstvenno-neodnorodnykh akusticheskikh poley ot mikroob"yektov* (Device for Visualization of Spatially Inhomogeneous Acoustic Fields from Micro-Objects), D.A. Zimnyakov, A.A. Kolotyryn, E.L. Nikishin, Priority 01.07.2011, Published 20.12.2012, Bulletin 35. (in Russ.)
3. Kolotyryn A.A., Zimnyakov D.A., Nikishin E.L., Zdravzhenskii R.A., Zavarin S.V. *Technical Physics Letters*, 2011, no. 11(37), pp.992-995. (in Russ.)
4. Korpel A. *Appl. Phys. Lett.*, 1966, vol. 9, pp. 425–427.
5. Pat. 3831135 US, *Optical imaging of sound fields by heterodyning*, R.A. Smith. Publ. 20.08.1974.
6. Ahmed M., Wayne G. *Trudy Instituta inzhenerov po elektronike i radioelektronike*, 1979, no. 4(67), pp. 170–190. (in Russ.)
7. Korpel A. *Acousto-optics*, NY, Marcel Dekker Inc., 1997, 396 p.
8. Kino S. *Acoustic waves*, NJ, Englewood Cliffs, 1987.
9. Nikishin E.L., Pavlova M.V., Suchilin A.V. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Seriya Fizika*, 2019, no. 3 (19), pp. 178–187, DOI: <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2019-19-3-178-187>. (in Russ.)
10. Patent RU 2658585, G01H 9/00, *Ustroystvo dlya vizualizatsii akusticheskikh poley ot mikroob"yektov* (A Device for Visualization of Acoustic Fields from Micro-Objects), D.A. Zimnyakov, Priority 02.05.2017, Published 21.06.2018, Bulletin 18. (in Russ.)
11. Matveev A.N. *Optika* (Optics), Moscow, 1985, 351 p. (in Russ.)
12. Dubovik A.S., Apenko G.V., Dureyko G.V. et al. *Prikladnaya optika* (Applied Optics), Moscow, 1982, 612 p. (in Russ.)
13. Blistanov A.A., Bondarenko V.S., Perelomova N.V. et al. *Akusticheskiye kristally: Spravochnik* (Acoustic Crystals: A Handbook), Moscow, 1982, 632 p. (in Russ.)
14. Gordon E.I. *Proc. IEEE*, 1966, no. 10(54), pp. 1391.
15. Magdich L.N., Molchanov V.Ya. *Akustoopticheskiye ustroystva i ikh primeneniye* (Acousto-Optical Devices and Their Application), Moscow, 1978, 112 p. (in Russ.)
16. Balakshy V.I., Parygin V.N., Chirkov L.E. *Fizicheskiye osnovy akustooptiki* (Physical Foundations of Acousto-Optics), Moscow, 1985, 280 p. (in Russ.)

Data on authors

- Alexey V. Suchilin** — Post-Graduate Student; Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Department of Physics; E-mail: aleksey.such@yandex.ru
- Eugeny L. Nikishin** — PhD, Associate Professor; Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Department of Physics; E-mail: nikel55@yandex.ru
- Maria V. Pavlova** — PhD, Associate Professor; Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Department of Physics; E-mail: pavlovam@yandex.ru

For citation: Suchilin A. V., Nikishin E. L., Pavlova M. V. Modeling the process of obtaining a stigmatic image of an acoustic object in an acousto-optic visualization device. *Journal of Instrument Engineering*. 2021. Vol. 64, N 1. P. 56—62 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-1-56-62