



Разработка акустооптического устройства для управления положением микрообъектов

Ю. В. Пичугина^{1,2}, А. С. Мачихин¹

¹ Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва, Россия

² Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва, Россия

В работе рассматривается метод акустооптического сканирования. Его характеризует высокая точность и возможность независимого управления несколькими оптическими ловушками при манипулировании микрообъектами с помощью оптического пинцета. Брэгговская дифракция света ультразвуковыми волнами позволяет создавать надежные твердотельные устройства для точного и быстрого отклонения лазерного луча. Описана схема оптического пинцета с двухмерным сканированием на базе ПК, реализованная двумя последовательными акустооптическими ячейками.

Ключевые слова: акустооптический дефлектор, оптический пинцет, оптическая ловушка, брэгговская дифракция, парателлурит

Статья поступила: 22.02.2020

Принята к публикации: 18.03.2020

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время разработка, изучение и использование оптических пинцетов вызывают большой научный и практический интерес. Оптический пинцет представляет собой оптический инструмент, который позволяет манипулировать микроскопическими объектами с помощью лазерного света. Данный метод основан на возможности жесткой фокусировки лазерного

Development of Acousto-Optic Device for Manipulating Micro-Objects

Y. V. Pichugina^{1,2}, A. S. Machikhin¹

¹ Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation, Russian Academy of Sciences, Butlerova street, 15, Moscow, Russia, 117342

² Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Vavilov street, 38, Moscow, Russia, 119991
e-mail: pichuginaa@yandex.ru

We discuss acousto-optic scanning characterized by high precision and repetition rate for manipulating micro-objects using optical tweezers. Bragg diffraction of light via ultrasonic waves allows creating robust solid-state devices for precise and fast laser beam deflection. We describe a scheme of the optical tweezers with PC-driven two-dimensional scanning implemented by two sequential acousto-optical cells.

Keywords: acousto-optic deflector, optical tweezers, optical trap, Bragg diffraction, paratellurite.

Received on: 22.02.2020

Accepted on: 18.03.2020

INTRODUCTION

Currently, the development, study and use of optical tweezers are of great scientific and practical interest. Optical tweezers is an optical tool that allows you to manipulate microscopic objects using laser light. This method is based on the possibility of tight focusing of laser radiation, in which a spatially inhomogeneous optical field near the waist of a highly focused laser beam forms an effective spatial potential well.

A key element of optical tweezers is a scanning system designed to control the beam and its parameters [1–2]. Most existing optical tweezers use mirror and mirror-lens systems to control the position of the light trap. Such systems do not allow for quick movement of the trap from one arbitrary point of view to another due to the high inertia of the systems for

излучения, в котором пространственно неоднородное оптическое поле вблизи перетяжки сильно сфокусированного лазерного луча формирует эффективную пространственную потенциальную яму.

Ключевым элементом оптического пинцета является система сканирования, предназначенная для управления пучком и его параметрами [1-2]. В большинстве существующих оптических пинцетов для управления положением световой ловушки используют зеркальные и зеркально-линзовые системы. Такие системы не позволяют быстро перемещать ловушку из одной произвольной точки поля зрения в другую из-за высокой инерционности систем перемещения зеркал и линз, а к юстировке схем на основе таких систем предъявляются высокие требования, что ведет к необходимости использовать дорогие и сложные приводные механизмы и делает невозможным создание нескольких световых ловушек одновременно. Системы управления, в основе которых лежат жидкокристаллические (немеханические) модуляторы оптического излучения, лишены некоторых недостатков, свойственных зеркальным и зеркально-линзовым системам, однако обладают низким быстродействием. В сравнении с известными системами манипулирования, акустооптический дефлектор характеризуется на порядок более высоким быстродействием, возможностью независимого управления несколькими оптическими ловушками, мгновенным, высокоточным, адресным (скачкообразным) перемещением ловушки в пределах поля зрения.

В данной работе рассматривается двухкоординатная акустооптическая (АО) сканирующая система для немеханического манипулирования микрообъектами с помощью оптического пинцета. В АО системе, положение ловушки определяется только частотой акустических волн, возбуждаемых в кристаллах. Скорость настройки ограничена в основном временем прохождения акустической волны в кристалле, которое обычно составляет несколько микросекунд [3].

Полученные результаты показывают преимущества и перспективы АО немеханического манипулирования микрообъектами с помощью оптического пинцета.

ПРИНЦИПАЛЬНАЯ СХЕМА

Схема оптических пинцетов для манипулирования микрообъектами с помощью двумерного АО-сканирования показана на рис. 1. Диаметр

moving mirrors and lenses. Moreover, there are high demands on the adjustment of circuits based on such systems, which leads to the need to use expensive and complex drive mechanisms and makes impossible to create multiple light traps at the same time. Control systems, which are based on liquid crystal (non-mechanical) optical radiation modulators, are devoid of some of the drawbacks inherent in mirror and mirror-lens systems, but they have low speed. In comparison with the well-known manipulation systems, the acousto-optical deflector is characterized by an order of magnitude higher speed, the ability to independently control several optical traps, instantaneous, high-precision, addressed (jump-like) movement of the trap within the field of view.

In this research, we consider a two-coordinate acousto-optic (AO) scanning system for non-mechanical manipulation of micro-objects using optical tweezers. In the AO system, the position of the trap is determined only by the frequency of the acoustic waves excited in the crystals. The tuning speed is limited mainly by the propagation time of the acoustic wave in the crystal, which is usually several microseconds [3].

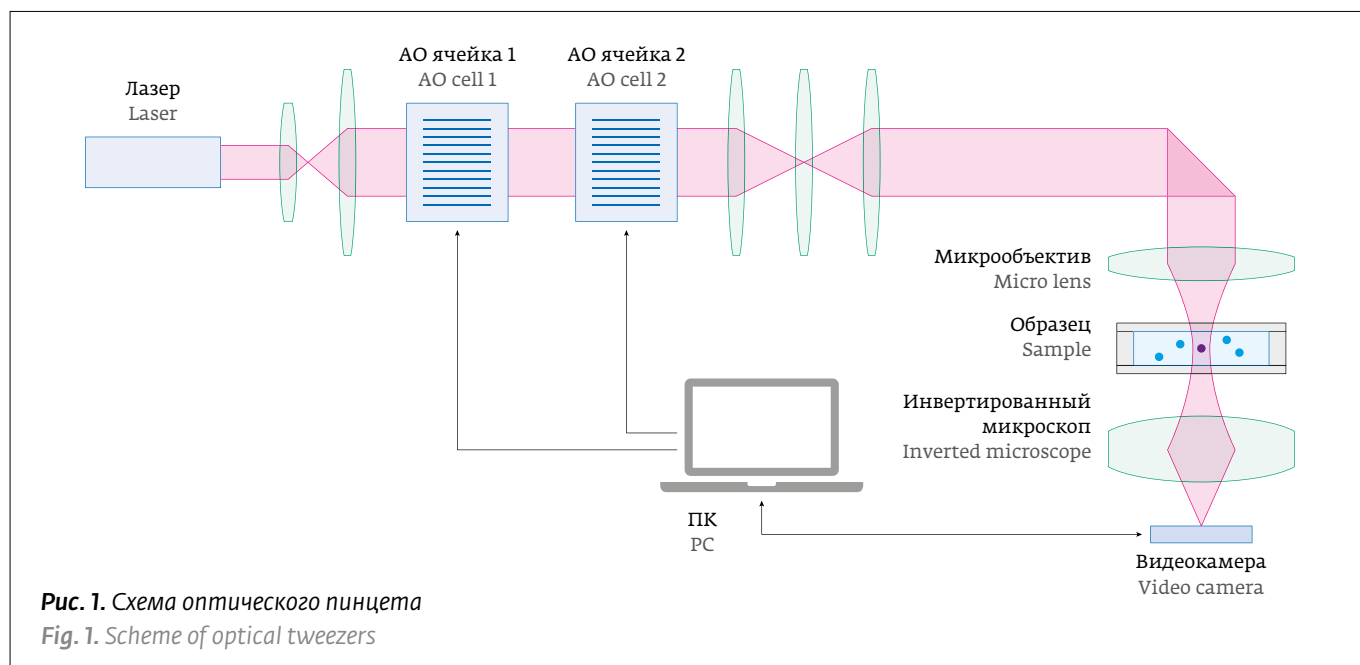
The results show the advantages and prospects of AO non-mechanical manipulation of micro-objects using optical tweezers.

CIRCUIT SCHEME

A scheme of optical tweezers for manipulating micro-objects using two-dimensional AO scanning is shown in Fig. 1. The diameter of the laser beam is increased using a beam expander, and then directed to a two-coordinate acousto-optical deflector (AOD), which is two identical orthogonal AO cells. The first AO cell deflects the laser beam in the meridional plane, the second in the sagittal plane, so that the diameter of the beam does not change. A lens system is necessary for pairing AO cells and a micro lens, which focuses laser radiation on the sample under study located in the cuvette. Moving the last lens, you can move the hauling of laser radiation along the axis, i.e. focus the beam. A digital camera with a microscopic imaging system is located on the opposite side of the sample, and allows real-time monitoring and control of the position of the light trap.

ACOUSTO-OPTICAL DEFLECTOR

AO cell is a TeO_2 crystal, to one of the edges of which a piezoelectric transducer is attached. When voltage is applied to the piezoelectric transducer, an acoustic wave propagates in the crystal, which creates a dynamic diffraction grating for the laser beam passing



лазерного луча увеличен с помощью расширителя пучка, и после направлен к двухкоординатному акустооптическому дефлектору (АОД), который представляет собой две одинаковые ортогональные АО ячейки. Первая АО ячейка отклоняет лазерный луч в меридиональной плоскости, вторая – в сагиттальной плоскости, так что диаметр луча не изменяется. Система линз необходима для сопряжения АО ячеек и микрообъектива, которая фокусирует лазерное излучение на исследуемый образец, расположенный в кювете. Двигая последнюю линзу можно перемещать перетяжку лазерного излучения вдоль оси, т. е. выполнять фокусировку пучка. Цифровая камера с микроскопической системой визуализации размещена на противоположной стороне образца, и позволяет в режиме реального времени наблюдать и контролировать положение световой ловушки.

АКУСТООПТИЧЕСКИЙ ДЕФЛЕКТОР

АО ячейка представляет собой кристалл TeO_2 , к одному из краев которого прикреплен пьезопреобразователь. При подаче напряжения на пьезопреобразователь в кристалле распространяется акустическая волна, которая создает динамическую дифракционную решетку для лазерного пучка, проходящего через кристалл [4]. Изменяя и модулируя напряжение на АОД, первый дифракционный максимум лазерного пучка отклоняется на контролируемые углы. Возбуждение звуковых волн происходит при подаче сиг-

through the crystal [4]. By changing and modulating the voltage at the AOD, the first diffraction maximum of the laser beam is deflected by controlled angles. The excitation of sound waves occurs when the signals from the electronic driver to the electrodes. The driver consists of a generator and a broadband amplifier. To implement the traveling sound wave regime, an acoustic absorber is attached to the opposite face of the crystal. Fast modulation leads to the fact that the optical trap switches between different positions, i. e., it creates several traps. The schematic design and composition of a single-axis acousto-optical scanning system in the Bragg diffraction mode is shown in Fig. 2.

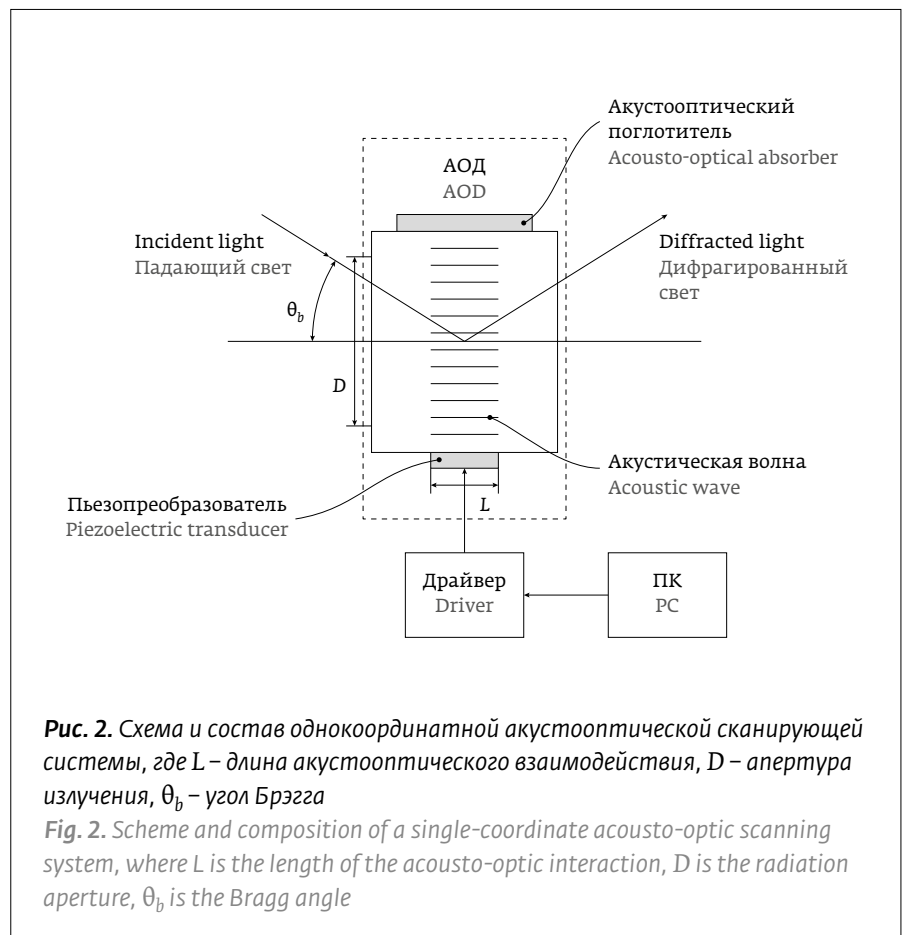
For two-dimensional spatial scanning, the deflector consists of two sequential AO cells rotated by 90° . Fig. 3 shows a scheme of a two-coordinate deflector with a two-channel electronic driver.

For this study, we developed a two-coordinate scanning AO system consisting of two identical cells from TeO_2 crystals. Each of them operates in an anisotropic Bragg diffraction mode. The developed deflector has a typical configuration: the angle of incidence of light in the crystal is $\theta_0 = 5.56^\circ$ and the length of the acousto-optical interaction is $L = 2$ mm. A slow shear acoustic wave propagates in the crystal in the (001) plane at an angle $\alpha = 7.5^\circ$ to the [110] direction (Fig. 4a). The sound wave vector \vec{q} is directed at an angle $\gamma = 91.5^\circ$ to the [110] axis and tangentially to the surface of the refractive indices of diffraction light. A vector diagram of this type of AO diffraction is shown in Fig. 4b.

налов от электронного драйвера на электроды. Драйвер состоит из генератора и широкополосного усилителя. Для реализации режима бегущей звуковой волны к противоположной грани кристалла прикреплен акустический поглотитель. Быстрая модуляция приводит к тому, что оптическая ловушка переключается между разными положениями, т.е. создается несколько ловушек. Схематическая конструкция и состав однокоординатной акустооптической сканирующей системы в режиме дифракции Брэгга показан на рис. 2.

Для двумерного пространственного сканирования дефлектор состоит из двух последовательных АО ячеек, повернутых на 90°. На рис. 3 показана схема двухкоординатного дефлектора с двухканальным электронным драйвером.

Для этого исследования мы разработали двухкоординатную сканирующую АО систему, состоящую из двух идентичных ячеек из кристаллов TeO₂. Каждая из них работает в режиме анизотропной дифракции Брэгга. Разработанный дефлектор имеет типичную конфигурацию: угол падения света в кристалле $\theta_0 = 5,56^\circ$ и длину акустоопти-



The maximum deviation angles $\Delta\varphi_x \times \Delta\varphi_y$ can be calculated as:

$$\Delta\varphi_x = \frac{2}{\Gamma_{RS}} \arctan\left(\frac{\Delta x}{2f_{MO}}\right), \quad (1)$$

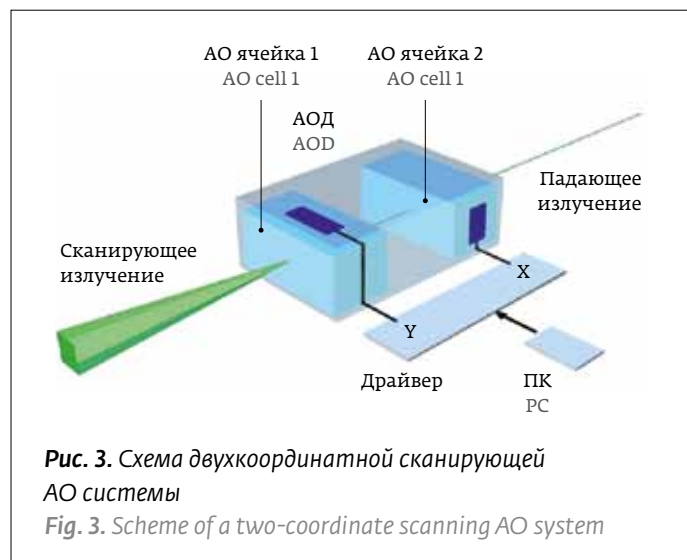
$$\Delta\varphi_y = \frac{2}{\Gamma_{RS}} \arctan\left(\frac{\Delta y}{2f_{MO}}\right), \quad (2)$$

where $\Delta x \times \Delta y$ are the dimensions of the sample, f_{MO} is the focal length of the micro-lens, Γ_{RS} is the increase in the relay system.

The angular resolution of the AOD is limited by diffraction and cannot exceed $1.22 (\lambda/D)$. The number of $N_x \times N_y$ positions allowed by the deflector is determined by the ratio of the angular scanning range $\Delta\varphi_x \times \Delta\varphi_y$ and the angular resolution:

$$N_x = \frac{\Delta\varphi_x D_0}{1,22\lambda}, \quad (3)$$

$$N_y = \frac{\Delta\varphi_y D_0}{1,22\lambda}, \quad (4)$$



ческого взаимодействия $L=2$ мм. Медленная сдвиговая акустическая волна в кристалле распространяется в плоскости (001) под углом $\alpha=7,5^\circ$ к направлению [110] (рис. 4а). Вектор звуковой волны \vec{q} направлен под углом $\gamma=91,5^\circ$ к оси [110] и по касательной к поверхности показателей преломления дифракционного света. Векторная диаграмма этого типа АО дифракции показана на рис. 4б.

Максимальные углы отклонения $\Delta\varphi_x \times \Delta\varphi_y$ можно рассчитать как:

$$\Delta\varphi_x = \frac{2}{\Gamma_{RS}} \arctan\left(\frac{\Delta x}{2f_{MO}}\right), \quad (1)$$

$$\Delta\varphi_y = \frac{2}{\Gamma_{RS}} \arctan\left(\frac{\Delta y}{2f_{MO}}\right), \quad (2)$$

где $\Delta x \times \Delta y$ - размеры образца, f_{MO} - фокусное расстояние микрообъектива, Γ_{RS} - увеличение релейной системы.

Угловое разрешение АОД ограничено дифракцией и не может превышать $1,22(\lambda/D)$. Число положений $N_x \times N_y$, разрешенных дефлектором, определяется отношением углового диапазона сканирования $\Delta\varphi_x \times \Delta\varphi_y$ и угловым разрешением:

$$N_x = \frac{\Delta\varphi_x D_0}{1,22\lambda}, \quad (3)$$

$$N_y = \frac{\Delta\varphi_y D_0}{1,22\lambda}, \quad (4)$$

где D_0 - диаметр лазерного луча, λ - длина волны лазера.

Диаметр входного зрачка АО ячейки D должен быть больше, чем диаметр лазерного луча D_0 :

$$D_0 = \Gamma_{BE} d, \quad (5)$$

$$D > D_0,$$

где Γ_{BE} - увеличение расширителя пучка, d - начальный диаметр лазерного пучка.

Диапазон изменения частоты ультразвука, приложенного к АО ячейкам находится как:

$$\Delta f = \frac{V(\alpha)}{\lambda} \Delta\varphi. \quad (6)$$

С помощью этих формул мы можем вычислить параметры АО ячеек. Например, это необходимо

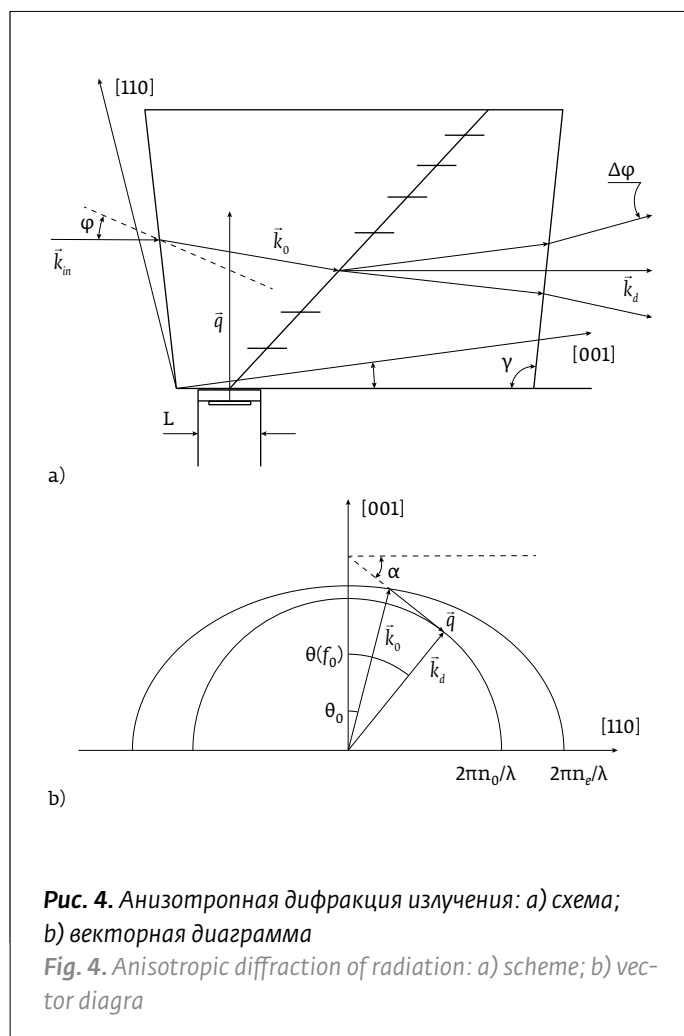


Рис. 4. Анизотропная дифракция излучения: а) схема; б) векторная диаграмма

Fig. 4. Anisotropic diffraction of radiation: a) scheme; b) vector diagram

where D_0 is the diameter of the laser beam, λ is the laser wavelength.

The diameter of the entrance pupil AO of the cell D should be larger than the diameter of the laser beam D_0 :

$$D_0 = \Gamma_{BE} d, \quad (5)$$

$$D > D_0,$$

where Γ_{BE} is the increase in the beam expander, d is the initial diameter of the laser beam.

The frequency range of the ultrasound applied to the AO cells is found as:

$$\Delta f = \frac{V(\alpha)}{\lambda} \Delta\varphi. \quad (6)$$

Using these formulas, we can calculate the parameters of AO cells. For example, it is necessary to capture particles with a diameter of $\delta=1 \mu\text{m}$ in the range $\Delta x \times \Delta y=100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ using a micro lens with

для улавливания частиц диаметром $\delta=1$ мкм в диапазоне $\Delta x \times \Delta y = 100$ мкм \times 100 мкм, используя микрообъектив с $f_{MO}=3,6$ мм, и He-Ne лазер ($\lambda=632,8$ нм) с диаметром пучка $d=1,2$ мм. Используя формулы, мы установили параметры нашей установки: $\Gamma_{BE}=5$, $\Gamma_{RS}=1$, $D_0=6$ мм, $\Delta\varphi_x \times \Delta\varphi_y \approx 1,5^\circ \times 1,5^\circ$, $N_x \times N_y \approx 250 \times 250$, $\Delta f=32$ МГц. В настоящее время мы собираем установку, показанную на рис. 1 с приведенными параметрами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе обсуждается АО двумерная система отклонения для немеханического манипулирования микрообъектами с помощью оптического пинцета. Мы разработали и изготовили ячейки АО, которые могут стать основой такой сканирующей системы. Правильное назначение параметров АОД и параметров других компонентов позволяет построить систему оптического захвата [5–7].

REFERENCES

1. Grover S., Skirtach A., Gauthier R., Grover C. Automated single-cell sorting system based on optical trapping. *J. Biomed. Opt.* 2001; 6(1): 14–22. DOI: 10.1117 / 1.1333676.
2. Jing Liu, Zhiyuan Li. Controlled Mechanical Motions of Microparticles in Optical Tweezers *Micromachines*. 2018; 9(5): 232. DOI: 10.3390 / mi9050232.
3. Merenda F., Rohner J., Fournier J., Salathé R. Miniaturized high-NA focusing-mirror multiple optical tweezers. *Opt. Express*. 2007;15(10): 6075–6086. DOI: 10.1364 / oe.15.006075.
4. Магдич Л. Н., Молчанов В. Я. *Акустооптические устройства и их применение*. – М.: Сов.радио. 1978. 112 с.
Magdich L. N., Molchano V. Y. *Acoustooptic devices and their applications*. – M.: Sov.radio. 1978. 112 p.
5. Галкин М. Л., Носов П. А., Ковалев М. С., Вереникина Н. М. Расчет и анализ распределения поля лазерного пучка после реальной оптической системы. *J. Physics: Conf. Series*. 1096.012120. DOI:10.1088/1742-6596/1096/1/012120.
Galkin M. L., Nosov P. A., Kovalev M. S., Verenikina N. M. Calculation and analysis of the laser beam field distribution after a real optical system. *J. Physics: Conf. Series*. 1096.012120. DOI:10.1088/1742-6596/1096/1/012120.
6. Bobrinev V. I., Kovalev M. S., Odínokov S. B., Sagatelyan G. R. Investigation of the properties of a beam reconstructed from volume holographic optical elements used in optical observation devices. *Russ. Phys. J.* 2016; 58(10): 1457–66. DOI:10.1007/s11182-016-0668-0.
7. Kovalev M. S., Krasin G. K., Odínokov S. B., Zherdev A. Y. Optical wavefields measurement by digital holography methods. *J. Phys.: Conf. Series*. 2018; 1096(1). DOI:10.1088/1742-6596/1096/1/012112.

АВТОРЫ

Пичугина Юлия Владимировна, e-mail: pichuginaa@yandex.ru, младший научный сотрудник, Лаборатория наногradientной оптики, магнитных материалов и структур, Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН; аспирант, Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва, Россия
ORCID: 0000-0002-0095-2066

Мачихин Александр Сергеевич, д. т. н., ведущий научный сотрудник, Лаборатория акустооптической спектроскопии, Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва, Россия.
ORCID: 0000-0002-2864-3214

$f_{MO}=3.6$ mm and a He-Ne laser ($\lambda=632.8$ nm) with a beam diameter of $d=1.2$ mm. Using formulas, we established the parameters of our setup: $\Gamma_{BE}=5$, $\Gamma_{RS}=1$, $D_0=6$ mm, $\Delta\varphi_x \times \Delta\varphi_y \approx 1,5^\circ \times 1,5^\circ$, $N_x \times N_y \approx 250 \times 250$, $\Delta f=32$ MHz. We are currently assembling the installation shown in Fig. 1 with the given parameters.

CONCLUSION

In this research, we discuss the AO two-dimensional deflection system for non-mechanical manipulation of microobjects using optical tweezers. We have developed and manufactured AO cells, which can become the basis of such a scanning system. Correct assignment of AOD parameters and parameters of other components allows constructing an optical capture system [5–7].

ABOUT AUTHORS

Pichugina Julia Vladimirovna, e-mail: pichuginaa@yandex.ru, Junior Researcher, Laboratory of Nano-Gradient Optics, Magnetic Materials and Structures, Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences; graduate student, Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
ORCID: 0000-0002-0095-2066

Machikhin Alexander Sergeevich, Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Acousto-Optic Spectroscopy, Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.
ORCID: 0000-0002-2864-3214



For us, optical fiber is as pure as nature.

WE LOVE PURE RESULTS
Fishing but also the fiber draw process require concentration, time and reflection. The purity of nature as well as high quality telecom fiber technology are found here in Finland. Latest improvements result in 3000 m/min - speed and precision for your success.

rosendahlnextrom.com

KNILL GRUPP MADE IN EUROPE