

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ, ВЕЩЕСТВ, МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ (05.11.13)

УДК 681.7

DOI: 10.24160/1993-6982-2018-6-120-127

Применение акустооптической фильтрации света для решения задач неразрушающего контроля

А.С. Мачихин, В.Э. Пожар

Оптические методы получения информации являются одними из наиболее эффективных при решении задач неразрушающего контроля (НК) различных технических объектов. Подход, основанный на использовании акустооптического (АО) эффекта — явления дифракции света на звуке, качественно расширяет возможности классических методов визуально-измерительного контроля.

Проанализированы возможности создания новых мультимодальных информационно-измерительных систем для НК на базе АО фильтрации излучения. Показано, что они позволяют реализовать различные аналитические методы на единых элементной и методической базах. Описаны возможные практические применения систем на основе АО перестраиваемых фильтров для различных задач НК. Представлен видеоспектрометрический модуль для жестких и гибких эндоскопов. Он основан на двойной АО монохроматизации света, обеспечивает произвольную спектральную адресацию в видимом диапазоне длин волн и прецизионное измерение спектров отражения в произвольных точках. Описан прибор для трехмерной визуализации объектов в произвольных спектральных интервалах. Он базируется на одновременной АО фильтрации двух стереоскопических пучков, переносящих изображения. Подобный прибор может быть выполнен в виде законченного модуля и перспективен для многих приложений. Даны схемы оптической когерентной микроскопии, основанной на АО фильтрации световых пучков в приемном канале интерферометра Майкельсона, и мультиспектральной цифровой голографической микроскопии на основе АО фильтрации широкополосного излучения в интерферометре Маха-Цендера. По сравнению с известными решениями данный подход обеспечивает большее число спектральных каналов, увеличение спектрального контраста, уменьшение чувствительности к внешним засветкам и повышение стабильности функционирования.

Ключевые слова: видеоспектрометрия, акустооптическое взаимодействие, спектральная фильтрация, неразрушающий контроль.

Для цитирования: Мачихин А.С., Пожар В.Э. Применение акустооптической фильтрации света для решения задач неразрушающего контроля // Вестник МЭИ. 2018. № 6. С. 120—127. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-6-120-127.

Acousto-Optic Filtration of Light for Non-Destructive Testing Applications

A.S. Machikhin, V.E. Pozhar

Optical methods are among the most effective ones for non-destructive testing (NDT) of various technical objects. An approach based on using the acousto-optic (AO) effect, i.e., light diffraction on sound, significantly expands the possibilities of conventional visual measurement examination methods.

The possibilities of developing new multimodal information and measurement systems for NDT based on AO filtration of light are analyzed. It is shown that the use of such systems opens the possibility to implement various analytical methods on a unified component and methodological basis. Possible practical applications of systems constructed on the basis of tunable AO filters for different NDT tasks are described. A spectral imaging module attachable to conventional rigid and flexible optical endoscopes is presented. The developed module, the operation of which is based on subjecting light to double monochromatization, ensures the possibility of arbitrary spectral addressing in the visible range of wavelengths and high-precision measurement of reflection spectra at arbitrary points. A device for 3D imaging of objects in arbitrary spectral intervals is described. Its operation principle is based on simultaneous AO filtration of two stereoscopic light beams carrying images. Such a device may be produced as a self-contained module and is promising for many applications. Basic

schematic arrangements of optical coherence microscopy are presented. Central to the proposed technique are AO filtration of light beams in the Michelson interferometer's receiving channel and multispectral digital holographic microscopy based on AO filtration of wideband radiation in the Mach-Zehnder interferometer. In comparison with the known solutions, the suggested approach offers the possibility to obtain a larger number of spectral channels, better spectral contrast, lower sensitivity to external flares, and more stable operation.

Key words: spectral imaging, acousto-optic interaction, spectral filtration, non-destructive testing.

For citation: Machikhin A.S., Pozhar V.E. Acousto-Optic Filtration of Light for Non-Destructive Testing Applications. MPEI Vestnik. 2018;6:120—127. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2018-6-120-127.

Введение

В настоящее время методы визуально-измерительного контроля (ВИК) — одни из наиболее распространенных среди методов неразрушающего контроля (НК) ракетных и авиационных двигателей, труб, парогенераторов и других промышленных объектов [1 — 3]. Благодаря им проводят бесконтактный анализ состояния поверхности объекта, контроль ее формы, измерение геометрических размеров выявленных дефектов. Особый интерес представляют методы, позволяющие анализировать пространственное распределение (imaging) одновременно нескольких параметров отраженного от объекта или прошедшего через него излучения: направления, интенсивности, фазы, частоты, поляризации. Они существенно различны, и объединение их в одном приборе, зачастую необходимое для решения поставленной задачи, затруднительно.

Подходом, способствующим решению данной проблемы, является применение технологии динамических дифракционных решеток, создаваемых в среде акустическими волнами. Она позволила создать разнообразные виды функциональных АО устройств для управления характеристиками оптического излучения (модуляторы, затворы, дефлекторы, фильтры) и продолжает развиваться благодаря расширению элементной базы оптоэлектроники и вычислительной техники [4, 5].

Описаны оригинальные разработанные авторами методы НК, использующие акустооптические (АО) перестраиваемые фильтры. Основная характеристика АО фильтров (функция пропускания) определяется структурой объемной решетки, создаваемой ультразвуковыми волнами, а потому, варьируя параметры высокочастотного (ВЧ) сигнала, подаваемого на излучатель ультразвука, можно создавать неоднородные решетки и, соответственно, получать функции пропускания, отличные от классической формы. Например, линейная частная модуляция позволяет расширить полосу пропускания АО фильтра при сохранении высокого коэффициента пропускания в ней [6]. Возможность управления формой окна пропускания АО фильтров посредством модуляции ультразвука помогает использовать такие фильтры в модуляционной, корреляционной, дифференциальной спектроскопии [7].

Другая важная особенность АО фильтров — возможность мгновенного (за микросекунды) переключения на любую длину волны. Это позволило разра-

ботать методы фрагментарной регистрации спектра, в которых регистрируются только точки спектра, несущие информацию, необходимую для решения задачи.

Такой подход позволяет сократить время регистрации спектра в 10...100 раз по сравнению с непрерывным сканированием. Более того, алгоритм анализа может меняться непосредственно в ходе измерений, а если эти изменения основаны на получаемой информации, то их можно назвать адаптационными, то есть направленными на оптимизацию характеристик спектрометра по отношению к измеряемому спектру [8].

Акустооптическая видеоспектрометрия

Приборы для качественного и количественного исследования спектрального состава света, излучаемого, поглощаемого, отражаемого или рассеиваемого объектом, позволяют судить о его свойствах, химическом составе и характере физических процессов, связанных с излучением или взаимодействием света с веществом объекта. Тенденцией современной спектрометрии является создание видеоспектрометров — оптико-электронных приборов, предназначенных для регистрации и анализа одновременно пространственных и спектральных характеристик объекта.

Для получения подобных изображений используют разные подходы и аппаратуру [9,10], но наиболее универсальным является метод, основанный на использовании перестраиваемых оптических фильтров. При этом спектрометр последовательно настраивают на те интервалы спектра излучения, где отсутствуют фоновые помехи и наиболее интенсивно проявляются физические, химические и другие свойства исследуемого объекта, что позволяет получить изображение, контрастно отображающее именно эти свойства. Данный подход позволяет увеличить скорость сбора пространственно-спектральных данных, оптимизировать процедуры их анализа и создавать принципиально новые адаптивные методы визуализации объектов [7, 8]. Среди электронно-перестраиваемых фильтров наибольшее распространение получили АО монохроматоры, обеспечивающие во многих случаях оптимальное по сравнению с другими монохроматорами (жидкокристаллическими, Фабри-Перо) сочетание пространственного и спектрального разрешения, светосилы, диапазона и скорости перестройки [11, 12].

Возможности обработки изображений с помощью дифракции световых пучков на акустических волнах не ограничиваются их спектральной фильтрацией. За-

висимость характеристик АО взаимодействия от направления распространения, длины волны и типа поляризации падающей волны, параметров ультразвуковой волны и свойств используемого материала дает широкие возможности по созданию специализированных геометрий АО взаимодействия и режимов работы АО элементов: модуляции и синтеза передаточной функции, фильтрации неполяризованного излучения, многооконной фильтрации, двойного брэгговского акустооптического взаимодействия, дифракции многоцветного излучения и др. [13 — 16]. Уникальные особенности АО фильтров позволяют с их помощью реализовать не только спектральную фильтрацию изображения, но и методы дифференциальной спектроскопии, фазовой визуализации, разностно-поляризационной визуализации, пространственной фильтрации и оконтуривания изображений, то есть возложить на АО спектрометры часть функций обработки информации, которые в «классической» схеме спектрометров обычно выполняют либо специализированные аппаратные средства, либо методы цифровой постобработки. К настоящему времени разработаны и эксплуатируются АО устройства, позволяющие в реальном времени управлять поляризацией, спектральным составом и пространственной структурой светового пучка [5, 13 — 18]. Схемы АО видеоспектрометров, используемых в задачах НК: эндоскопического (для исследования труднодоступных объектов) [19] и микроскопического (для исследования микроструктуры поверхности) [20] представлены на рис. 1, 2.

Наиболее важные характеристики АО видеоспектрометра определяются параметрами используемого в нем АО монохроматора. Первым из них является рабочий спектральный диапазон, в соответствии с которым отбирают подходящие материалы. Дополнительным критерием выбора является величина АО качества M_2 кристалла, определяющая необходимую величину управляющей мощности акустической волны, генерирующей дифракционную решетку в кристалле. Ввиду огромного преимущества по эффективности во всех диапазонах, кроме ультрафиолетового, используется парателлуриит (TeO_2). Однако для задач, требующих высокого спектрального разрешения, необходима кол-

линейная геометрия дифракции, которая не может быть реализована на TeO_2 . В этих случаях используются кварц (SiO_2) и более эффективный молибдат кальция (CaMoO_4).

Второй параметр АО видеоспектрометра — величина контраста его функции пропускания, имеющей теоретически вид $\sin^2 x/x^2$, то есть отношение пропускания фильтра в максимуме функции к пропусканию вне пределов основного окна. Чем выше этот контраст, тем выше отношение сигнал/фон при регистрации и тем точнее получаемая спектральная информация. Увеличение контраста, а также компенсация пространственно-спектральных искажений обеспечиваются двойной монохроматизацией: последовательным пропусканием света через две АО ячейки или две рабочие области одной ячейки [21, 22]. Двойные монохроматоры, требующие специальной конструкции и технологии изготовления, реализованы на основе различных кристаллов, а на TeO_2 — создано несколько различных вариантов [23].

Акустооптическая стереоскопия

Существуют задачи НК, в которых не достаточно определить свойства поверхности образца, а требуется исследовать пространственное распределение свойств объектов, имеющих не плоскую, а рельефную (трехмерную) поверхность, то есть получить более полную информацию о расположении и форме элементов исследуемого объекта. Добавление к классической системе регистрации двумерных спектральных изображений $I(x, y, \lambda)$ возможности регистрировать пространственную координату (глубину) z позволяет получить новые аналитические возможности — регистрацию четырехмерного распределения $I(x, y, z, \lambda)$. Поэтому весьма перспективным представляется изучение возможности использования АО ячеек в схемах регистрации такого распределения методами стереоскопии [24].

Система получения спектральных стереоизображений позволяет выделить и зарегистрировать два пучка света, отображающих объект наблюдения в двух разных ракурсах и на произвольно задаваемой длине волны, причем пучки могут иметь взаимно ортогональную поляризацию (рис. 3) [25]. По паре зарегистрированных спектральных изображений методами машинного

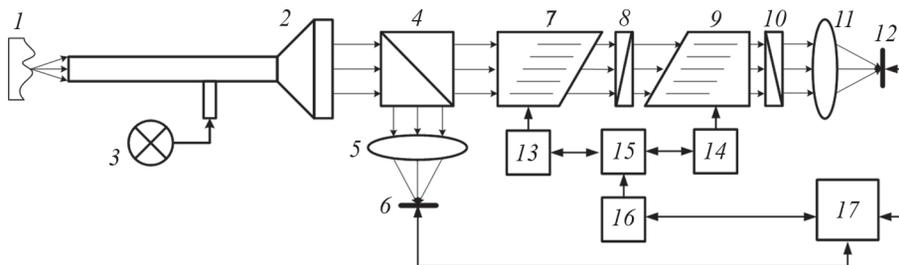


Рис. 1. Структурная схема эндоскопического двухканального АО видеоспектрометра:

1 — исследуемый объект; 2 — эндоскопический зонд; 3 — широкополосный источник света; 4 — поляризующий светоделитель; 5 — объектив; 6 — цветная видеокамера; 7, 9 — АО ячейки; 8, 10 — поляризаторы; 11 — монохромная видеокамера; 13, 14 — ВЧ-усилители; 15 — ВЧ-генератор; 16 — контроллер; 17 — ПК

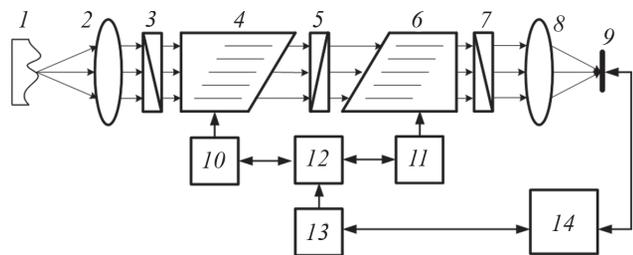


Рис. 2. Структурная схема АО видеоспектрометра для анализа микрообъектов:

1 — исследуемый объект; 2 — микрообъектив; 3, 5, 7 — поляризаторы; 4, 6 — АО ячейки; 8 — объектив; 9 — монохромная видеокамера; 10, 11 — ВЧ усилители; 12 — ВЧ генератор; 13 — контроллер; 14 — ПК

зрения можно восстановить трехмерный образ объекта [26]. Для сильно поляризующих объектов данная система фактически выполняет функцию спектрального поляриметра — она определяет поляризационные характеристики разных точек объекта на произвольных длинах волн. При этом может быть реконструирована и форма объекта, если он имеет хорошо выраженные пространственные особенности (углы, ребра и т.п.) или спектрально-яркостные признаки (затененные углубления или сильно рассеивающие выступы, например, царапины). Во многих случаях, когда имеется априорная информация о свойствах объекта (многогранник, пузырь и др.), по ключевым точкам можно реконструировать точную форму поверхности объекта и одновременно определить пространственные, спектральные и поляризационные характеристики.

Оптическая когерентная томография

Оптическая когерентная томография в спектральной области (ОКТ СО) широко используется для НК технических изделий и материалов, в частности, при

анализе деформаций и в дефектоскопии [27, 28]. Этот метод позволяет получить распределение коэффициента отражения по глубине образца путем пересчета спектральной зависимости интенсивности света на фотоприемнике, измеренной путем перестройки рабочей длины волны интерферометра.

Устройства ОКТ СО выгодно отличают отсутствие подвижных частей, возможность работы в полном поле, высокая производительность. Для спектральной перестройки в методе ОКТ СО используется либо перестраиваемый в широком диапазоне длин волн источник света и последовательная во времени регистрация спектральных изображений, либо широкополосный источник света с пространственным разложением в спектр сигнала на выходе интерферометра и регистрация его линейкой фотоприемников. Еще одним вариантом реализации спектральной перестройки является АО фильтрация интерферирующих световых пучков, переносящих изображения, в выходном канале интерферометра [29]. Как показано в [30], подход позволяет создавать мультимодальные аналитические системы, так как допускает исследование объекта не только в режиме ОКТ, но и методами широкополосной (световой) и спектральной микроскопии. Данные мультимодальные системы необходимы при изучении динамических процессов и в случаях, когда перемещение исследуемого объекта с одной установки на другую для последовательного анализа не представляется возможным.

В системах ОКТ СО с АО фильтрацией на входе интерферометра используется широкополосный источник излучения, из спектра которого АО монохроматором выделяется узкая спектральная составляющая. Применение широкополосного источника позволяет избежать спеклшумов в интерферограммах в отличие от схем ОКТ СО на основе перестраиваемых лазерных источников высококогерентного излучения. Интерференционные схемы на основе АО фильтрации излучения в приемном канале

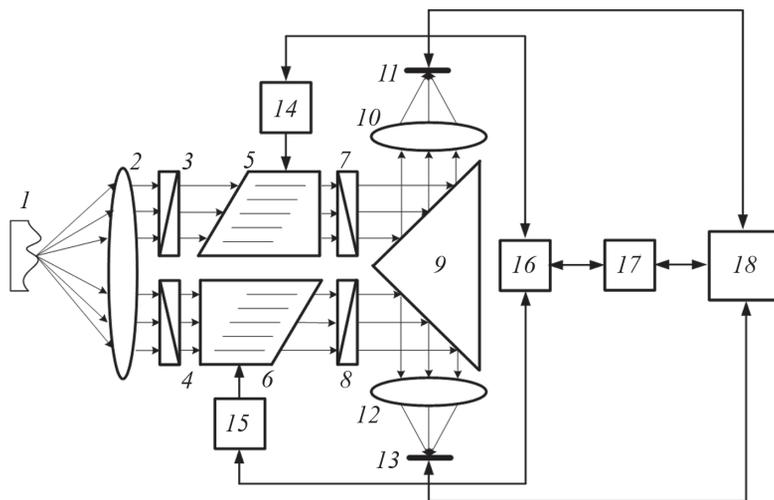


Рис. 3. Структурная схема АО стереоспектрометра:

1 — исследуемый объект; 2 — входной объектив; 3, 4, 7, 8 — поляризаторы; 5, 6 — АО ячейки; 9 — зеркальная призма; 10, 12 — объективы; 11, 13 — монохромные видеокамеры; 14, 15 — ВЧ-усилители; 16 — ВЧ-генератор; 17 — контроллер; 18 — ПК

выгодно отличают устойчивость к внешним засветкам, программное управление, произвольная спектральная адресация и другие достоинства.

На рис. 4 изображены две схемы ОКТ СО для решения различных задач НК. В первой для исследования формы микрообъектов и их подповерхностной структуры объект располагают в фокальной плоскости в одной из ветвей интерферометра [30]. Перестройка рабочей длины волны с помощью АО фильтра позволяет получить спектральную зависимость, из которой можно определить распределение оптических свойств по глубине объекта. Во второй оптически прозрачный объект вводится в одну из ветвей вне оптической оси так, чтобы излучение проходило через него только один раз [31]. Это дает возможность определить поперечное распределение вносимой им фазовой задержки и, как следствие,

локализовать и оценить размеры имеющихся неоднородностей и дефектов.

При соответствующей доработке описанный подход может найти применение не только в схемах ОКТ СО, но и в схемах цифровой голографической микроскопии [32] и других интерференционных системах для анализа амплитудно-фазовой структуры объектов.

Заключение

Проведенный обзор разработанных методов визуализации показывает широкие возможности использования АО систем для задач НК, а именно для измерения пространственно-спектральных, поляризационных и амплитудно-фазовых характеристик объектов. Дальнейшее развитие указанного подхода позволит создавать новые мультимодальные информационно-измерительные системы для ВИК.

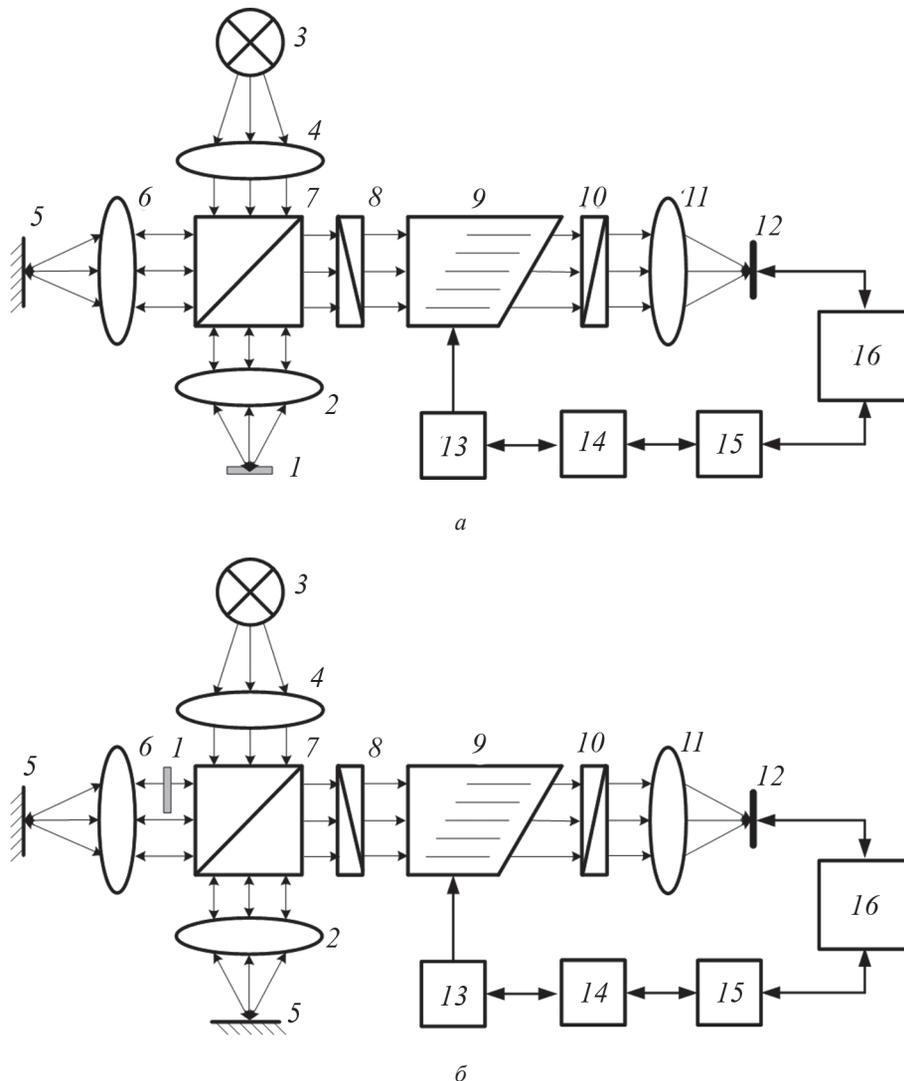


Рис. 4. Структурные схемы ОКТ СО с АО фильтрацией излучения в приемном канале для исследования подповерхностной пространственной (а) и внутренней фазовой (б) структур объектов:

1 — исследуемый объект; 2, 6 — идентичные микрообъективы; 3 — широкополосный источник света; 4 — коллимирующая оптическая система; 5 — плоские зеркала; 7 — светоделитель; 8, 10 — поляризаторы; 9 — АО ячейка; 11 — объектив; 12 — монохромная видеокамера; 13 — ВЧ-усилитель; 14 — ВЧ-генератор; 15 — контроллер; 16 — ПК

Литература

References

1. **Mix P.** Introduction to Nondestructive Testing: A Training Guide. John Wiley & Sons, 2005.
2. **Клюев В.В., Соснин Ф.Р., Ковалев А.В.** Неразрушающий контроль и техническая диагностика. М.: Машиностроение, 2003.
3. **Zhu Y., Tian G., Lu R., Zhang H.** A Review of Optical NDT Technologies // *Sensors*. 2011. V. 11. Pp. 7773—7798.
4. **Goutzulis A, Rape D.** Design and Fabrication of Acousto-optic Devices. N.-Y.: Dekker, 1994.
5. **Молчанов В.Я. и др.** Теория и практика современной акустооптики. М.: МИСИС, 2015.
6. **Магдич Л.Н.** Аппаратная функция акустооптического фильтра при перестройке частоты // *Оптика и спектроскопия*. 1980. Т. 49. №. 2. С. 387—390.
7. **Пожар В.Э., Пустовойт В.И.** Акустооптические спектральные технологии // *Известия РАН. Серия «Физическая»*. 2015. Т. 79. № 10. С. 1375—1380.
8. **Фадеев А.В., Пожар В.Э.** Построение адаптивных спектроанализаторов на основе акустооптических спектрометров // *Оптический журнал*. 2013. Т. 80. № 7. С. 50—57.
9. **Chang C.** Hyperspectral Imaging: Techniques for Spectral Detection and Classification. Springer Science & Business Media, 2003.
10. **Hagen N., Kudenov M.W.** Review of Snapshot Spectral Imaging Technologies // *Optical Eng.* 2013. V. 52 (9). Pp. 090901—090901.
11. **Stratis D. e. a.** Comparison of Acousto-optic and Liquid Crystal Tunable Filters for Laser-Induced Breakdown Spectroscopy // *Appl. Spectroscopy*. 2001. V. 55 (8). Pp. 999—1004.
12. **Bubion L., Miller P., Hayden A.** Comparison of AOTF, Grating, and FTS Imaging Spectrometers for Hyperspectral Remote Sensing Applications // *Proc. SPIE*. 2000. V. 4049. Pp. 239—249.
13. **Denes L., Gottlieb M., Kaminsky B., Metes P.** AOTF Polarization Difference Imaging // *Proc. SPIE*. 1999. V. 3584. Pp. 106—115.
14. **Balakshy V.I., Kostyuk D.E.** Acousto-optic Image Processing // *Appl. Optics*. 2009. V. 48. No. 7. Pp. 24—32.
15. **Котов В.М.** Акустооптика. Брэгговская дифракция многоцветного излучения. М.: Янус-К, 2016.
16. **Voloshinov V.B., Molchanov V.Ya., Mosquera J.C.** Spectral and Polarization Analysis of Optical Images by Means of Acousto-optics // *Optics & Laser Technology*. 1996. V. 28. No. 2. Pp. 119—127.
17. **Molchanov V.Ya. e. a.** Acousto-optical Imaging Spectropolarimetric Devices: New Opportunities and Developments // *Proc. SPIE*. 2014. V. 9147. Pp. 91472—92480.
18. **Huth J.F.** History and Background of Acousto-optical Tunable Filters (AOTFs) for Imagery Intelligence Applications // *Proc. SPIE*. 1999. V. 3584. Pp. 136—141.
19. **Мачихин А.С. и др.** Акустооптический модуль для визуального и спектрометрического эндоскопиче-
1. **Mix P.** Introduction to Nondestructive Testing: A Training Guide. John Wiley & Sons, 2005.
2. **Klyuev V.V., Sosnin F.R., Kovalev A.V.** Nerazrushayushchiy Kontrol' i Tekhnicheskaya Diagnostika. M.: Mashinostroenie, 2003. (in Russian).
3. **Zhu Y., Tian G., Lu R., Zhang H.** A Review of Optical NDT Technologies. *Sensors*. 2011;11:7773—7798.
4. **Goutzulis A, Rape D.** Design and Fabrication of Acousto-optic Devices. N.-Y.: Dekker, 1994.
5. **Molchanov V.Ya. i dr.** Teoriya i Praktika Sovremennoy Akustooptiki. M.: MISIS, 2015. (in Russian).
6. **Magdich L.N.** Apparatnaya Funktsiya Akustoopticheskogo Fil'tra pri Perestrojke Chastoty. *Optika i Spektroskopiya*. 1980;49; 2:387—390. (in Russian).
7. **Pozhar V.E., Pustovoyt V.I.** Akustoopticheskie Spektral'nye Tekhnologii. *Izvestiya RAN. Seriya «Fizicheskaya»*. 2015;79;10:1375—1380. (in Russian).
8. **Fadeev A.V., Pozhar V.E.** Postroenie Adaptivnyh Spektroanalizatorov na Osnove Akustoopticheskikh Spektrometrov. *Opticheskiy Zhurnal*. 2013;80;7:50—57. (in Russian).
9. **Chang C.** Hyperspectral Imaging: Techniques for Spectral Detection and Classification. Springer Science & Business Media, 2003.
10. **Hagen N., Kudenov M.W.** Review of Snapshot Spectral Imaging Technologies. *Optical Eng.* 2013;52 (9):090901—090901.
11. **Stratis D. e. a.** Comparison of Acousto-optic and Liquid Crystal Tunable Filters for Laser-Induced Breakdown Spectroscopy. *Appl. Spectroscopy*. 2001;55 (8):999—1004.
12. **Bubion L., Miller P., Hayden A.** Comparison of AOTF, Grating, and FTS Imaging Spectrometers for Hyperspectral Remote Sensing Applications. *Proc. SPIE*. 2000;4049:239—249.
13. **Denes L., Gottlieb M., Kaminsky B., Metes P.** AOTF Polarization Difference Imaging. *Proc. SPIE*. 1999;3584:106—115.
14. **Balakshy V.I., Kostyuk D.E.** Acousto-optic Image Processing. *Appl. Optics*. 2009;48;7:24—32.
15. **Kotov V.M.** Akustooptika. Breggovskaya Difraktsiya Mnogotsvetnogo Izlucheniya. M.: Yanus-K, 2016. (in Russian).
16. **Voloshinov V.B., Molchanov V.Ya., Mosquera J.C.** Spectral and Polarization Analysis of Optical Images by Means of Acousto-optics. *Optics & Laser Technology*. 1996;28. No. 2:119—127.
17. **Molchanov V.Ya. e. a.** Acousto-optical Imaging Spectropolarimetric Devices: New Opportunities and Developments. *Proc. SPIE*. 2014;9147:91472—92480.
18. **Huth J.F.** History and Background of Acousto-optical Tunable Filters (AOTFs) for Imagery Intelligence Applications. *Proc. SPIE*. 1999;3584:136—141.
19. **Machihin A.S. i dr.** Akustoopticheskiy Modul' dlya Vizual'nogo i Spektrometricheskogo Endoskopicheskogo

ского контроля // Труды НПО Энергомаш им. академика В.П. Глушко. 2016. Т. 33. С. 227—238.

20. **Мачихин А.С. и др.** Акустооптический видеоспектрометр для измерения пространственного распределения температуры микрообъектов // Приборы и техника эксперимента. 2017. № 3. С. 100—105.

21. **Zhang C., Zhang Z., Wang H., Yang Y.** Spectral Resolution Enhancement of Acousto-optic Tunable Filter by Double-filtering // Optics Express. 2008. V. 16 (14). Pp. 10234—10239.

22. **Machikhin A.S., Batshev V.I., Pozhar V.E.** Aberration Analysis of AOTF-based Spectral Imaging Systems // J. Opt. Soc. Am. A. 2017. V. 34 (7). Pp. 1109—1113.

23. **Епихин В.М. и др.** Акустооптические спектрометры изображения видимого и ближнего ИК диапазонов // Физические основы приборостроения. 2013. Т. 2. № 4 (9). С. 116—125.

24. **Machikhin A.S., Pozhar V.E.** Single-AOTF-based Stereoscopic 3-Dimensional Spectral Imaging Systems Based on a Single Acousto-optical Tunable Filter // J. Phys.: Conf. Ser. 2015. V. 661. P. 012041.

25. **Мачихин А.С., Батшев В.И., Пожар В.Э., Мазур М.М.** Акустооптический стереоскопический спектрометр полного поля для восстановления объемной структуры объектов в произвольных спектральных интервалах // Компьютерная оптика. 2016. № 6. С. 871—877.

26. **Forsyth D.A., Ponce J.** Computer Vision: a Modern Approach. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 2012.

27. **Drexler W., Fujimoto J.** Optical Coherence Tomography. Technology and Applications. Springer, 2008.

28. **Dubois A.** Handbook of Full-field Optical Coherence Microscopy: Technology and Applications. CRC Press, 2016.

29. **Мачихин А.С., Бурмак Л.И., Пожар В.Э.** Расчет интерференционной картины, формируемой переносящими изображения световыми пучками после дифракции на акустической волне в одноосном кристалле // Компьютерная оптика. 2017. Т. 41. № 2. С. 169—174.

30. **Machikhin A.S. et al.** Acousto-optical Tunable Filter for Combined Wideband, Spectral and Optical Coherence Microscopy // Appl. Optics. 2015. V. 54 (25). Pp. 7508—7513.

31. **Мачихин А.С., Бурмак Л.И., Пожар В.Э.** Визуализация фазовой структуры оптически прозрачных объектов на основе акустооптической фильтрации интерференционных изображений // Приборы и техника эксперимента. 2016. № 6. С. 57—61.

32. **Machikhin A.S., Polschikova O.V., Ramazanova A.G., Pozhar V.E.** Multi-spectral Quantitative Phase Imaging Based on Filtration of Light via Ultrasonic Wave // J. Optics. 2017. V. 19. P. 075301.

Kontrolya. Trudy NPO Energomash im. Akademika V.P. Glushko. 2016;33:227—238. (in Russian).

20. **Machihin A.S. i dr.** Akustoopticheskiy Videospektrometr dlya Izmereniya Prostranstvennogo Raspreleniya Temperatury Mikroob'ektov. Pribory i tekhnika eksperimenta. 2017;3:100—105. (in Russian).

21. **Zhang C., Zhang Z., Wang H., Yang Y.** Spectral Resolution Enhancement of Acousto-optic Tunable Filter by Double-filtering. Optics Express. 2008;16 (14):10234—10239.

22. **Machikhin A.S., Batshev V.I., Pozhar V.E.** Aberration Analysis of AOTF-based Spectral Imaging Systems. J. Opt. Soc. Am. A. 2017;34 (7):1109—1113.

23. **Епихин В.М. и др.** Akustoopticheskie Spektrometry Izobrazheniya Vidimogo i Blizhnego IK Diapazonov.. Fizicheskie Osnovy Priborostroeniya. 2013;2;4 (9): 116—125. (in Russian).

24. **Machikhin A.S., Pozhar V.E.** Single-AOTF-based Stereoscopic 3-Dimensional Spectral Imaging Systems Based on a Single Acousto-optical Tunable Filter. J. Phys.: Conf. Ser. 2015;661:012041.

25. **Machihin A.S., Batshev V.I., Pozhar V.E., Mazur M.M.** Akustoopticheskiy Stereoskopicheskiy Spektrometr Polnogo Polya dlya Vosstanovleniya Ob'emnoy Struktury Ob'ektov v Proizvol'nyh Spektral'nyh Intervalah. Komp'yuternaya Optika. 2016;6:871—877. (in Russian).

26. **Forsyth D.A., Ponce J.** Computer Vision: a Modern Approach. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 2012.

27. **Drexler W., Fujimoto J.** Optical Coherence Tomography. Technology and Applications. Springer, 2008.

28. **Dubois A.** Handbook of Full-field Optical Coherence Microscopy: Technology and Applications. CRC Press, 2016.

29. **Machihin A.S., Burmak L.I., Pozhar V.E.** Raschet Interferentsionnoy Kartiny, Formiruemoy Perenosyashchimi Izobrazheniya Svetovymi Puchkami Posle Difraksii na Akusticheskoy Volne v Odnoosnom Kristalle. Komp'yuternaya Optika. 2017;41;2:169—174. (in Russian).

30. **Machikhin A.S. et al.** Acousto-optical Tunable Filter for Combined Wideband, Spectral and Optical Coherence Microscopy. Appl. Optics. 2015;54 (25):7508—7513.

31. **Machihin A.S., Burmak L.I., Pozhar V.E.** Vizualizatsiya Fazovoy Struktury Opticheski Prozrachnykh Ob'ektov na Osnove Akustoopticheskoy Fil'tratsii Interferentsionnykh Izobrazheniy. Pribory i Tekhnika Eksperimenta. 2016;6:57—61. (in Russian).

32. **Machikhin A.S., Polschikova O.V., Ramazanova A.G., Pozhar V.E.** Multi-spectral Quantitative Phase Imaging Based on Filtration of Light via Ultrasonic Wave. J. Optics. 2017;19:075301.

Сведения об авторах:

Мачихин Александр Сергеевич — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электротехники и интроскопии НИУ «МЭИ», ведущий научный сотрудник Научно-технологического центра уникального приборостроения РАН, e-mail: MachikhinAS@mpei.ru

Пожар Витольд Эдуардович — доктор физико-математических наук, заведующий отделом научно-технологического центра уникального приборостроения РАН, e-mail: vitold@ntcup.ru

Information about authors:

Machikhin Aleksandr S. — Ph.D. (Phys.-Math.), Assistant Professor of Electrical Engineering and Introscopy Dept., NRU MPEI, Leading Researcher of Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, e-mail: MachikhinAS@mpei.ru

Pozhar Vitold E. — Dr.Sci. (Phys.-Math.), Head of Department of Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, e-mail: vitold@ntcup.ru

Работа выполнена при поддержке: РФФИ (проект № 16-07-00393); Совета по грантам Президента Российской Федерации для поддержки молодых российских ученых (проект № МК-199.2017.8)

The work is executed at support: RFBR (grants No. 16-07-00393); Grant Council of the President of the Russian Federation for State Support of Young Russian Scientists (grants No. МК-199.2017.8)

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 16.03.2018

The article received to the editor: 16.03.2018