

УДК 535.241.13:534

ШИРОКОАПЕРТУРНЫЙ НЕКОЛЛИНЕАРНЫЙ АКУСТООПТИЧЕСКИЙ ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ ФИЛЬТР (АОПФ) НА ОСНОВЕ ПАРАТЕЛЛУРИТА

**И. А. Каплунов¹, А. И. Колесников¹, В. Я. Молчанов²,
А. И. Иванова¹, Д. В. Друина¹, С. Е. Ильяшенко³**

¹Тверской государственный университет, г. Тверь

²НТЦ Акустооптики МИСиС г. Москва

³Тверской государственный технический университет, г. Тверь

Исследованы особенности конструирования и рабочие характеристики акустооптических фильтров на основе кристаллов парателлурифта TeO_2 . Разработаны и изготовлены широкоапертурные одиночные и двойные фильтры, выполняемые в виде насадки на стандартные оптические микроскопы. Отмечены технологические проблемы, возникающие при изготовлении и управлении двойными фильтрами, преодоление которых приводит к значительному улучшению характеристик устройства.

Ключевые слова: акустооптические перестраиваемые фильтры, оптические кристаллы парателлурифта, мультиспектральная микроскопия

HIGH-APERTURE NONCOLLINEAR ACOUSTO-OPTICAL TUNABLE FILTER (AOTF) BASED ON PARATELLURITE

**I. A. Kaplunov¹, A. I. Kolesnikov¹, V. Ya. Molchanov²,
A. I. Ivanova¹, D. V. Druina¹, S. E. Ilyashenko³**

¹ Tver State University, Tver

²STC of Acoustooptics, NITU MISIS, Moscow

³ Tver State Technical University, Tver

Specific features of the design and working parameters of acousto-optical filters on the base of paratellurite TeO_2 are studied. High-aperture singular and double filters designed as headpieces to standard optical microscopes were worked out. Technological problems emerging in the course of preparation and control of double filters important for significant improvement of the device performance are discussed.

Keywords: acoustooptical tunable filters, paratellurite optical crystals, multispectral microscopy

Введение. Оптическая фильтрация широко используется для обнаружения и идентификации микрообъектов и для визуализации их структуры. Фильтр настраивается на выделение того интервала спектра

излучения, который связан с характерными свойствами исследуемого объекта или его элементов, что позволяет получать изображения, контрастно отображающие именно эти свойства. Такой подход был детально разработан для спектрозональной съёмки поверхности Земли, корреляционной спектроскопии газов в земной атмосфере и др. Несмотря на громадную разницу в размерах изучаемых объектов, алгоритмы, разработанные для земных исследований, успешно переносятся на микроскопические исследования [1].

Для задач спектральной микроскопии полоса пропускания оптических фильтров должна допускать перемещение по спектральному диапазону. К оптическим фильтрам, обеспечивающим плавное изменение выделяемого участка спектра, относятся перестраиваемые жидкокристаллические [2, 3] и акустооптические фильтры [4-6].

Несмотря на то, что усилия многих исследователей были направлены на исследование закономерностей спектральной обработки изображений акустооптическими методами, существует ряд задач, полностью не решенных до настоящего времени. Прежде всего, это задача создания акустооптических фильтров изображений, сочетающих высокое спектральное разрешение с высоким пространственным разрешением для фильтрации высших пространственных гармоник изображений.

Высокое пространственное разрешение может быть получено только в оптических системах, имеющих большую угловую апертуру или большое поле зрения. Анизотропное акустооптическое взаимодействие в кристаллах предполагает значительно большее многообразие геометрии, чем изотропное. Поэтому необходимость теоретического и экспериментального исследования закономерностей взаимодействия световых и звуковых полей в оптически и акустически анизотропных кристаллах с целью нахождения оптимальной геометрии акустооптического взаимодействия с большой угловой апертурой является очевидной.

Принцип действия акустооптического перестраиваемого фильтра изображений на основе анизотропной дифракции света. Принцип действия акустооптического фильтра основан на эффекте дифракции света в оптически анизотропном кристалле на ультразвуковых волнах. В качестве акустооптического кристалла для неколлинеарного взаимодействия в фильтрах видимого и ИК диапазона обычно используется монокристалл парателлурита. Уникальная совокупность оптических, акустических, фотоупругих и материальных констант делает данный материал наиболее перспективным для создания акустооптических фильтров обработки изображений. Для данной задачи следует использовать такую геометрию акустооптического взаимодействия, физической особенностью которой

является то обстоятельство, что ширина спектральной функции пропускания фильтра практически не зависит от направления падения света в угловой апертуре. Монокристалл парателлуриата обладает сильной анизотропией оптических, акустических и фотоупругих констант, поэтому параметры фильтра, в частности, угловая апертура в значительной мере зависит от ориентации призмы фильтра относительно кристаллографических осей. Схема неколлинеарного акустооптического фильтра изображений приведена на рис. 1.

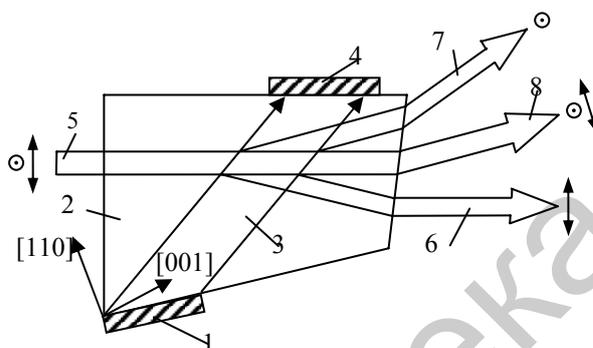


Рис. 1. Схема широкоапертурного акустооптического фильтра на монокристалле TeO_2 .

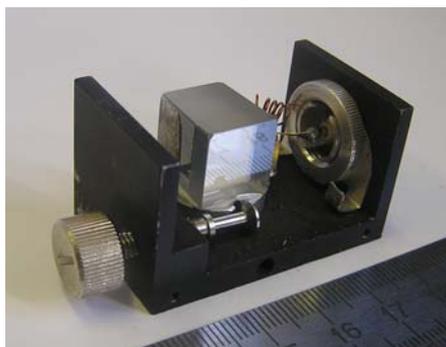
1 – пьезоэлектрический преобразователь; 2 – призма из парателлуриата; 3 – нормаль к фазовому звуковому фронту; 4 – демпфер; 5 – световой пучок; 6, 7 – дифрагированные или отфильтрованные лучи; 8 – луч нулевого порядка

Схема (рис. 1) демонстрирует принципиальную особенность акустооптического фильтра – одновременно со спектральным анализом проводить поляриметрический анализ изображений в реальном масштабе времени. Характерной особенностью фильтра изображений является комбинация высокого пространственного и спектрального разрешения с большим полем зрения, позволяющим наблюдать протяженные объекты с мелкими деталями.

Акустооптический фильтр для мультиспектрального микроскопа. Акустооптические фильтры могут иметь разновидности, оптимизированные для применения в тех или иных системах фотоники. В пределах каждой разновидности акустооптические фильтры могут отличаться такими параметрами, как оптическая апертура, спектральный диапазон длин волн, ширина спектральной функции пропускания (спектральное разрешение).

На рис. 2 представлен внешний вид разработанного и изготовленного в данной работе широкоапертурного акустооптического фильтра на основе монокристалла TeO_2 , выращенного в лаборатории кристаллизации Тверского госуниверситета. Сравнение характеристик

приведенного акустооптического фильтра видимого диапазона длин волн с зарубежным аналогом приведено в табл. 1.



Р и с . 2. Широкоапертурный акустооптический фильтр на монокристалле TeO_2

Можно сделать вывод, что предложенный акустооптический фильтр находится на уровне зарубежного аналога Crystal Technology (США) модель 97-017776-01, а в части светосилы и спектрального разрешения превосходит аналог.

Т а б л и ц а 1. Сравнение характеристик акустооптического фильтра видимого диапазона длин волн с зарубежным аналогом

Наименование показателей	Значения показателей		
	Разработанный фильтр	Отечественный аналог	Зарубежный аналог
	акустооптический фильтр	отсутствует	Crystal Techn. (США), модель 97-017776-01
Акустооптический материал	парателлурит		парателлурит
Тип акустической моды	сдвиговая		сдвиговая
Тип акустооптического взаимодействия	неколлинеарное		неколлинеарное
Тип оптической поляризации	линейная		линейная
Оптическая апертура	10×10 мм		5×5 мм
Спектральный диапазон	500...900 нм		405...700 нм
Спектральное разрешение	2...656нм		3... 656нм
Эффективность дифракции	Более 80 %		85 %
Входное сопротивление	50 Ом		50 Ом

Примечание 1. Для упрощения спектральное разрешение зарубежного аналога пересчитано с длины волны 405 нм на длину волны 656 нм.

Примечание 2. Спектральный диапазон разработанного фильтра сдвинут в ИК-область по сравнению с аналогом в соответствии с системными требованиями (для наблюдения спектров флуоресценции по методу LIF (Laser Induced Fluorescence))

Двойные акустооптические монохроматоры. Особенностью акустооптического фильтра является специфический характер функции пропускания, которая имеет множество боковых окон. Это обстоятельство ограничивает возможную сферу применения таких фильтров. В классической спектроскопии для снижения уровня пропускания вне основного окна широко используется так называемая двойная монохроматизация излучения, когда два оптических фильтра располагаются последовательно. Эффективность такого подхода при акустооптической фильтрации впервые была продемонстрирована еще в 1989 году в работах [7, 8]. Впоследствии двойная монохроматизация излучения широко обсуждалась в литературе [9-13]. Тем не менее, применение концепции двойной монохроматизации в акустооптике до настоящего времени не получило широкого распространения, поскольку изготовление и одновременное управление двумя акустооптическими фильтрами является относительно сложной задачей.

Мультиспектральный микроскоп на основе двойного перестраиваемого акустооптического фильтра описан в работах Мазура [16] и Мачихина и Пожара [17]. Конструктивно приёмная часть микроскопа состоит из оптического блока, включающего входную оптику, акустооптический фильтр (монохроматор) с двумя управляющими ВЧ устройствами, фотоприёмную ПЗС матрицу, устройство обработки сигнала, и блока источников питания.

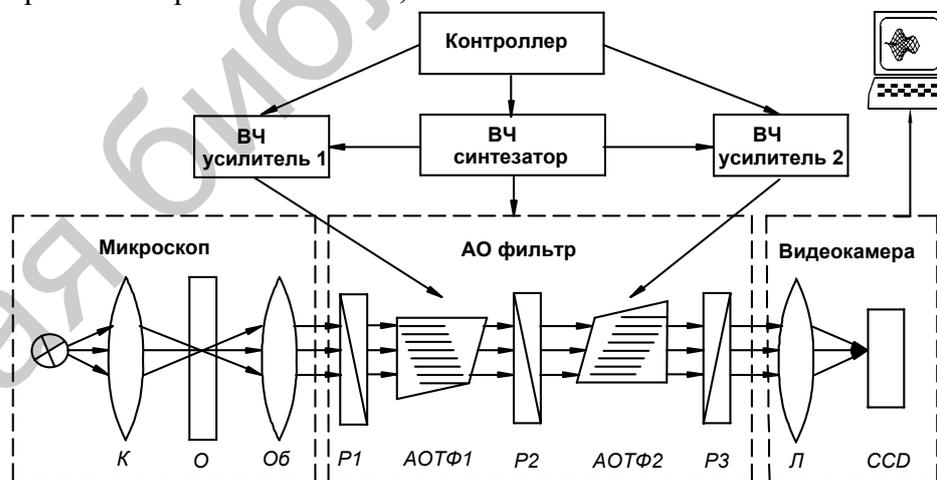


Рис. 2. Схема мультиспектрального микроскопа на основе двойного перестраиваемого акустооптического фильтра [16, 17].

Аппаратная функция акустооптического фильтра при малой эффективности дифракции описывается функцией $\text{sinc}^2(ax)$.

Коэффициент a связан с длиной акустооптического взаимодействия и определяет ширину полосы пропускания фильтра. В общем случае, когда в двойном монохроматоре используются акустооптические фильтры с различными длинами акустооптического взаимодействия, результирующая функция пропускания системы определяется выражением $\text{sinc}^2(a_1x) \cdot \text{sinc}^2(a_2x)$.

Изготовленный монохроматор представляет собой насадку, устанавливаемую вместе с видеокамерой на посадочное место бинокулярной насадки или выходной люк фотокамер стандартных микроскопов (Leitz, Zeiss, Neophot, ЛОМО). Управление прибором и вывод изображения осуществляются компьютером пользователя с программным обеспечением, осуществляющим управление фильтром и видеокамерой. Система позволяет получать серию спектральных изображений в интерактивном режиме.

К технологическим проблемам, возникающим при изготовлении и управлении двойными акустооптическими монохроматорами относятся согласование перестройки обоих фильтров, высокая точность контроля управляющих частот, идентичность конструкций светозвукопроводов, идентичность упругих и оптических констант материала светозвукопроводов, отсутствие конструктивных дефектов пьезопреобразователя, равенство температур светозвукопроводов в процессе работы. Проведённая работа показывает, что указанные трудности являются преодолимыми и они окупаются значительным улучшением характеристик устройства.

Работа поддержана проектом РФФИ 09-02-12400-офи_м и выполнена в рамках реализации ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009-2013 годы.

Список литературы

1. Harris A. T. Spectral mapping tools from the earth sciences applied to spectral microscopy data // *Cytometry*. 2006. V. 69A. P. 872–879.
2. Garini Y., Young I.T., McNamara G. Spectral imaging: principles and applications // *Cytometry*. 2006. V. 69A. P. 735–747.
3. Miller P.J. Use of tunable liquid crystal filters to link radiometric and photometric standards // *Metrologia*. 1991. V. 28. P. 145–149.
4. Chang I.C. Noncollinear acousto-optic tunable filters with large angular aperture // *Appl. Phys. Lett.* 1974. V. 25. P. 370–372.
5. Балакший В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. Физические основы акустооптики. М.: Радио и связь, 1985.
6. Магдич Л.Н., Молчанов В.Я. Акустооптические устройства и их применение. М.: Сов. Радио, 1978.
7. Мазур М.М., Шорин В.Н., Чижиков С.И., Леонов С.Н. Двойной акустооптический монохроматор на CaMoO_4 // *Оптика и спектроскопия*. 1989. Т.67. в.3. С.736–737.

8. Мазур М.М., Шорин В.Н., Абрамов А.Ю., Магомедов З.А., Мазур И.Л. Спектрометр с двойным акустооптическим монохроматором // Оптика и спектроскопия. 1996. Т.81. в.3. С.521–523.
9. Pustovoit V., Gupta N. IR acousto-optic spectrometer with double monochromator // EOS Topical Meeting Digest Series. 1999. V.24. P.5–36.
10. Pustovoit V.I., Pozhar V.E., Mazur M.M. et al. Double-AOTF spectral imaging system // Proc. SPIE. 2005. V. 5953.
11. Мазур М.М., Пожар В.Э., Пустовойт В.И., Шорин В.Н. Двойные акустооптические монохроматоры // Успехи современной радиоэлектроники. 2006. №10. С. 19–30.
12. Мачихин А.С., Пожар В.Э. Искажения изображения, возникающие при передаче через двойной акустооптический монохроматор // Электромагнитные волны и электронные системы. 2009. Т. 14. № 11. С. 63–68.
13. Zhang C., Zhang Z., Wang H., Yang Y. Spectral resolution enhancement of acousto-optic tunable filter by double-filtering // Optics Express. 2008. V. 16. P. 10234–10239.
14. Wack S., Hajri A., Heisel F., Sovinska M., Berger C., Whelan M., Marescaux J., Aprahamian M. Feasibility, sensitivity and reliability of laser induced fluorescent protein expressing tumors in vivo // Molecular Therapy. 2003. V. 7. P. 765-773.
15. Alfano R.R., Tata D.B., Cordero J., Tomashefsky P., Longo F.W., Alfano M.A. Laser induced fluorescence spectroscopy from native cancerous and normal tissue // IEEE Journ. Quant. Electronics. 1984. V. GE-20. P.1507-1511.
16. Мазур М.М. Физические и технологические основы разработки акустооптических приборов. Дисс ... докт. техн. наук. М., 2007.
17. Machihin A. S. and Pozhar V. E.. A Spectral Distortion Correction Method for an Imaging Spectrometer // Instruments and Experimental Techniques, 2009, Vol. 52, No. 6, pp. 847–853.

Об авторах:

КАПЛУНОВ Иван Александрович – доктор техн. наук, профессор кафедры прикладной физики ТвГУ, Ivan.Kaplunov@tversu.ru;

КОЛЕСНИКОВ Александр Игоревич - кандидат физ.-мат наук, доцент кафедры прикладной физики ТвГУ, Alexander.Kolesnikov@tversu.ru;

МОЛЧАНОВ Владимир Яковлевич - кандидат физ.-мат наук, главный научный сотрудник, зам. директора НТЦ акустооптики НИТУ МИСИС;

ИВАНОВА Александра Ивановна – ассистент кафедры прикладной физики ТвГУ;

ДРУИНА Дарья Викторовна – магистрант кафедры прикладной физики ТвГУ, sabiomoon@mail.ru;

ИЛЬЯШЕНКО Светлана Евгеньевна – кандидат физ.-мат наук, доцент кафедры технологии металлов и материаловедения ТГТУ.