

УДК 53.082.5

А. И. Колесников, И. А. Каплунов, В. Я. Молчанов,  
С. Е. Ильяшенко, Р. М. Гречишкин

## ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ АКУСТООПТИЧЕСКИЙ ФИЛЬТР НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛОВ ПАРАТЕЛЛУРИТА

Исследованы особенности конструирования и рабочие характеристики акустооптических фильтров на основе кристаллов парателлурита  $\text{TeO}_2$ . Приведено описание изготовленных широкоапертурных одиночных и двойных фильтров, представляющих собой насадки на стандартные оптические микроскопы.

*Ключевые слова:* мультиспектральная микроскопия, акустооптический фильтр, обработка изображений, парателлурит.

**Введение.** Оптическая фильтрация широко используется для обнаружения и идентификации микрообъектов и для визуализации их структуры. Фильтр настраивается на выделение того участка спектра излучения, который определяется характерными свойствами исследуемого объекта или его элементов, что позволяет получать изображения, контрастно отображающие именно эти свойства. Такой подход был детально разработан для спектральной съемки поверхности Земли, корреляционной спектроскопии газов в земной атмосфере и др. Несмотря на большую разницу в размерах изучаемых объектов, алгоритмы, разработанные для земных исследований, могут быть успешно использованы при микроскопических исследованиях [1].

К оптическим фильтрам, обеспечивающим плавное изменение выделяемого участка спектра, относятся перестраиваемые жидкокристаллические [2, 3] и акустооптические фильтры [4—6].

Исследованию закономерностей спектральной обработки изображений акустооптическими методами посвящено множество работ. Однако существует ряд задач, полностью не решенных до настоящего времени. Прежде всего, это создание акустооптических фильтров,

сочетающих высокое спектральное и пространственное разрешение для фильтрации высших пространственных гармоник изображений.

Высокое пространственное разрешение может быть получено только в оптических системах, имеющих большую угловую апертуру или большое поле зрения. Поэтому является очевидной необходимость теоретического и экспериментального исследования закономерностей взаимодействия световых и звуковых полей в оптически и акустически анизотропных кристаллах в целях нахождения оптимальных условий акустооптического взаимодействия с большой угловой апертурой.

В настоящей статье анализируется возможность создания перестраиваемого акустооптического фильтра на основе монокристаллов парателлуриата ( $\alpha\text{-TeO}_2$ ) для мультиспектральной микроскопии.

### Принцип действия акустооптического перестраиваемого фильтра изображений.

Принцип действия акустооптического фильтра (АОФ) основан на эффекте дифракции света в оптически анизотропном кристалле на ультразвуковых волнах. В качестве акустооптического кристалла для неколлинеарного взаимодействия в фильтрах видимого и инфракрасного диапазонов обычно используется монокристалл парателлуриата. Уникальная совокупность оптических, акустических, фотоупругих и других свойств делает данный материал наиболее перспективным для создания акустооптических фильтров обработки изображений. Для данной задачи следует использовать геометрию акустооптического взаимодействия, при которой ширина спектральной функции пропускания фильтра практически не зависит от направления падения света в угловой апертуре. Монокристаллы парателлуриата обладают сильной оптической и акустической анизотропией, поэтому параметры фильтра, в частности угловая апертура, в значительной мере зависят от ориентации призмы фильтра относительно кристаллографических осей. Схема широкоапертурного акустооптического фильтра изображений с ходом лучей представлена на рис. 1, где 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.

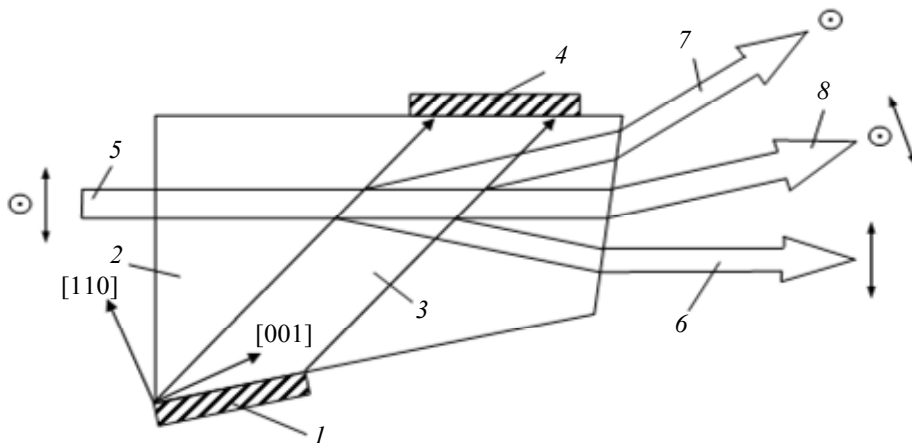


Рис. 1

Приведенная схема демонстрирует принципиальную особенность акустооптического фильтра: возможность одновременно со спектральным анализом проводить поляризметрический анализ изображений в реальном масштабе времени. Характерной особенностью фильтра изображений является комбинация высокого пространственного и спектрального разрешения с большим полем зрения, что позволяет наблюдать протяженные объекты с мелкими деталями.

**Акустооптический фильтр для мультиспектрального микроскопа.** Акустооптические фильтры могут иметь разновидности, оптимизированные для применения в различных системах фотоники. В пределах каждой разновидности акустооптические фильтры могут от-

личаться такими параметрами, как оптическая апертура, спектральный диапазон длин волн, ширина спектральной функции пропускания (спектральное разрешение).

На рис. 2 приведено фотоизображение (внутренняя структура) разработанного и изготовленного в НТЦ акустооптики НИТУ „МИСиС“ широкоапертурного акустооптического фильтра на основе монокристалла парателлуриата, выращенного в Тверском государственном университете. Анализ сравнительных характеристик (табл. 1) разработанного акустооптического фильтра видимого диапазона длин волн и зарубежного аналога (Crystal Technology, США, модель 97-017776-01) показывает, что предложенный фильтр находится на уровне зарубежного аналога, а по светосиле и спектральному разрешению превосходит его.

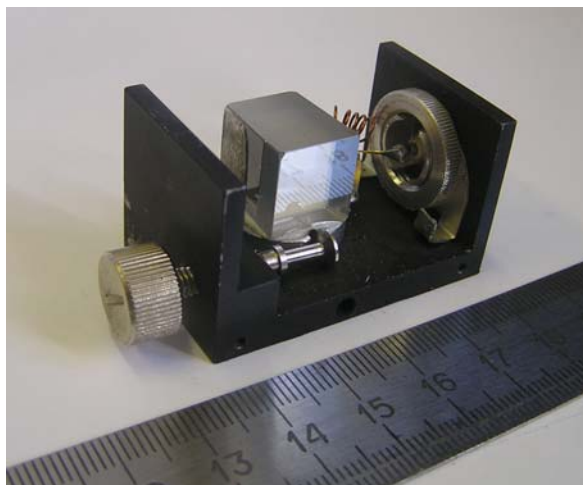


Рис. 2

Таблица 1

Характеристика	Разработанный акустооптический фильтр	Зарубежный аналог
Акустооптический материал	Парателлурит	Парателлурит
Тип акустической моды	Сдвиговая	Сдвиговая
Тип акустооптического взаимодействия	Неколлинearное	Неколлинearное
Тип оптической поляризации	Линейная	линейная
Оптическая апертура, мм	10×10	5×5
Спектральный диапазон длин волн, нм	500—900	405—700
Спектральное разрешение, нм	2,0—656	3,0—656
Диапазон рабочих частот, МГц	Определяется в процессе разработки	106—225
Эффективность дифракции, %	Более 80	85
Входное сопротивление, Ом	50	50

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

2. Спектральный диапазон разработанного фильтра сдвинут в ИК-область по сравнению с аналогом в соответствии с системными требованиями (для наблюдения спектров флуоресценции по методу интероперационной лазерной аутофлуоресцентной спектроскопии — ИОЛАС).

**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 в 1989 г. в работах [7, 8]. Впоследствии двойная монохроматизация излучения широко обсуждалась в литературе [9—13].

На рис. 3 приведена схема мультиспектрального микроскопа на основе двойного перестраиваемого акустооптического фильтра. Конструктивно приемная часть микроскопа состоит из оптического блока, включающего входную оптику, акустооптический фильтр (монохроматор) с двумя управляющими ВЧ-устройствами и фотоприемную ПЗС-матрицу, устройства обработки сигнала и блока источников питания.

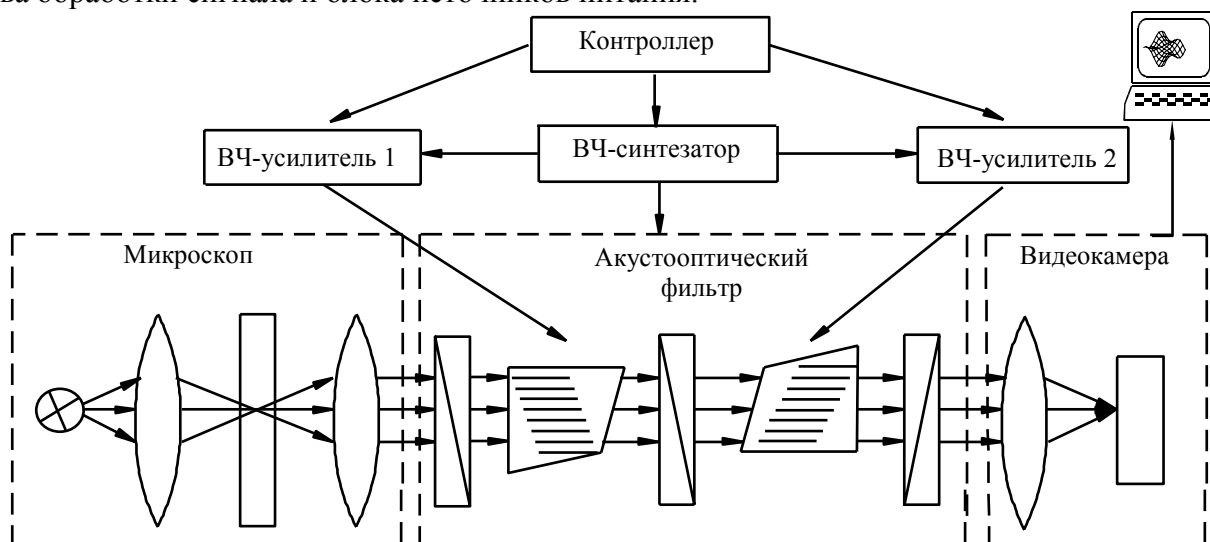


Рис. 3

Аппаратная функция акустооптического фильтра при малой эффективности дифракции описывается как  $\text{sinc}^2(ax)$ . Коэффициент  $a$  характеризует длину 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  $\text{sinc}^2(a_1x) \cdot \text{sinc}^2(a_2x)$ .

Как показывают расчеты, основные характеристики системы двойной монохроматизации при 100 %-ной эффективности дифракции соответствуют данным, приведенным в табл. 2.

Таблица 2

Характеристика	Тип монохроматора		
	Одинарный АОФ	Два одинаковых АОФ	Два разных АОФ
Соотношение длин взаимодействия	—	1	2/3
Относительная высота первого бокового максимума, %	11,6	1,36	0,33
Доля энергии вне полосы, %	21	2,0	1,0
Уменьшение ширины окна по отношению к одинарному АОФ, %	—	28	15

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

Следует отметить, что концепция двойной монохроматизации в акустооптике до настоящего времени не получила широкого распространения вследствие технологических проблем, возникающих при изготовлении двойных акустооптических монохроматоров и управлении ими. К таким проблемам относятся согласование перестройки обоих фильтров; необходимость обеспечения высокоточного контроля управляющих частот, идентичности конструкций светозвукопроводов, идентичности упругих и оптических констант материала светозвукопроводов; равенство температур светозвукопроводов в процессе работы. Проведенные

исследования показывают, что перечисленные трудности являются преодолимыми и окупаются значительным улучшением характеристик устройства.

Статья подготовлена по результатам работ, выполненных в рамках реализации федеральной целевой программы „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009—2013 гг.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Harris A. T.* Spectral mapping tools from the earth sciences applied to spectral microscopy data // *Cytometry*. 2006. Vol. 69A. P. 872—879.
2. *Garini Y., Young I. T., McNamara G.* Spectral imaging: principles and applications // *Cytometry*. 2006. Vol. 69A. P. 735—747.
3. *Miller P. J.* Use of tunable liquid crystal filters to link radiometric and photometric standards // *Metrologia*. 1991. Vol. 28. P. 145—149.
4. *Chang I. C.* Noncollinear acousto-optic tunable filters with large angular aperture // *Appl. Phys. Lett.* 1974. Vol. 25. P. 370—372.
5. *Балакиев 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  $\text{CaMoO}_4$  // *Оптика и спектроскопия*. 1989. Т. 67, вып. 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, вып. 3. С. 521—523.
9. *Pustovoit V., Gupta N.* IR acousto-optic spectrometer with double monochromator // *EOS Topical Meeting Digest Ser.* 1999. Vol. 24. P. 5—36.
10. “Double AOTF Spectral Imaging System” in acousto-optics and photoacoustics / *V. E. Pozhar, V. I. Pustovoit, I. B. Kutuza, A. V. Perchik, M. M. Mazur, V. N. Shorin* // *Proc. SPIE*. 2005. Vol. 5953. P. 200 — 203.
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. Vol. 16. P. 10234—10239.

**Сведения об авторах**

- Александр Игоревич Колесников** — канд. физ-мат. наук, доцент; Тверской государственный университет, кафедра прикладной физики; E-mail: Ivan.Kaplunov@tversu.ru
- Иван Александрович Каплунов** — д-р техн. наук, профессор; Тверской государственный университет, кафедра прикладной физики; E-mail: Ivan.Kaplunov@tversu.ru
- Владимир Яковлевич Молчанов** — канд. физ-мат. наук; НТЦ акустооптики Национального исследовательского технического университета „МИСиС“, Москва; заместитель директора; E-mail: aocenter@mail.ru
- Светлана Евгеньевна Ильяшенко** — канд. физ-мат. наук, доцент; Тверской государственный технический университет, кафедра технологии металлов и материаловедения; E-mail: SvIlyashenko@yandex.ru
- Ростислав Михайлович Гречишкин** — канд. физ-мат. наук, профессор; Тверской государственный университет, кафедра прикладной физики; E-mail: rostislav.grechishkin@tversu.ru

Рекомендована кафедрой  
прикладной физики ТвГУ

Поступила в редакцию  
17.02.11 г.