

НОВЫЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ И ЭЛЕМЕНТЫ

УДК 535.8

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АКУСТООПТИЧЕСКОГО ФИЛЬТРА, РАБОТАЮЩЕГО В ДИАПАЗОНЕ 450...1700 нм¹

© 2022 г. В. И. Батшев^{a, b, *}, А. Б. Козлов^{a, c}, М. О. Шарикова^a, А. С. Мачихин^{a, d}, Г. Н. Мартынов^a, А. В. Горевой^a, С. В. Боритко^{a, e}, В. А. Ломонов^g, Н. А. Моисеева^g

^a Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, ул. Бутлерова, 15, Москва, 117342 Российская Федерация

^b Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, ул. 2-я Бауманская, 5 корп. 1, Москва, 105005 Российская Федерация

^c Научно-исследовательский институт “Полюс” им. М.Ф. Стельмаха, ул. Введенского, 3 к. 1, Москва, 117342 Российская Федерация

^d Национальный исследовательский университет “МЭИ”, ул. Красноказарменная, 14, Москва, 111250 Российская Федерация

^e Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Институтский пер. 9, Долгопрудный Московской обл., 141701 Российская Федерация

^g Федеральный научно-исследовательский центр “Кристаллография и фотоника” РАН, Ленинский просп., 59, Москва, 119333 Российская Федерация

*E-mail: batshev@bmstu.ru

Поступила в редакцию 14.05.2022 г.

После доработки 23.06.2022 г.

Принята к публикации 28.06.2022 г.

Разработан акустооптический (АО) перестраиваемый фильтр на основе кристалла парателлурита (TeO₂) с двумя пьезопреобразователями, обеспечивающий произвольную спектральную адресацию в диапазоне 450...1700 нм. Геометрические параметры кристалла рассчитаны из условия минимизации хроматического сдвига изображения в конфокальной оптической системе спектрометра в пределах всего рабочего спектрального диапазона. Представлены результаты экспериментального исследования разрешающей способности и функции пропускания в зависимости от апертуры АО-фильтра и рабочей длины волны. Приведены примеры спектральных изображений тестовых объектов, полученных с помощью макета видеоспектрометра, собранного на основе разработанного АО-фильтра.

DOI: 10.31857/S0033849422120026

ВВЕДЕНИЕ

Акустооптические (АО) перестраиваемые спектральные фильтры основаны на брэгговской дифракции электромагнитного излучения на объемной фазовой решетке, образованной акустической волной в среде за счет фотоупругого эффекта [1]. Они достаточно широко используются при решении различных научных, биомедицинских и промышленных задач. Компактность, отсутствие подвижных частей, произвольная спектральная адресация и другие достоинства таких фильтров позволяют создавать на их основе как классические спектрометры для анализа спектрального состава излучения [2, 3], так и видеоспектромет-

ры – приборы для получения пространственно-спектральных данных для дистанционного зондирования [4], микроскопии [5, 6], эндоскопии [7, 8], интерферометрии [9] и других приложений.

Одним из основных недостатков АО-фильтров принято считать относительно небольшой спектральный диапазон перестройки. Он, как правило, не превышает одну октаву и ограничен диапазоном согласования пьезопреобразователя, используемого для возбуждения ультразвука, с управляющим генератором [10]. Для преодоления данного ограничения могут использоваться два АО-фильтра, согласованных на соседние спектральные диапазоны, но при этом увеличиваются габариты, масса, сложность управления и стоимость видеоспектрометра. Расширить спектральный диапазон АО-фильтра на основе одиночной АО-ячейки можно за счет увеличения размера кристалла и применения двух пьезо-

¹ Работа доложена на Пятой Международной молодежной конференции “Информационные технологии и технологии коммуникации: современные достижения” (Астрахань, 4–7 октября 2021 г.).

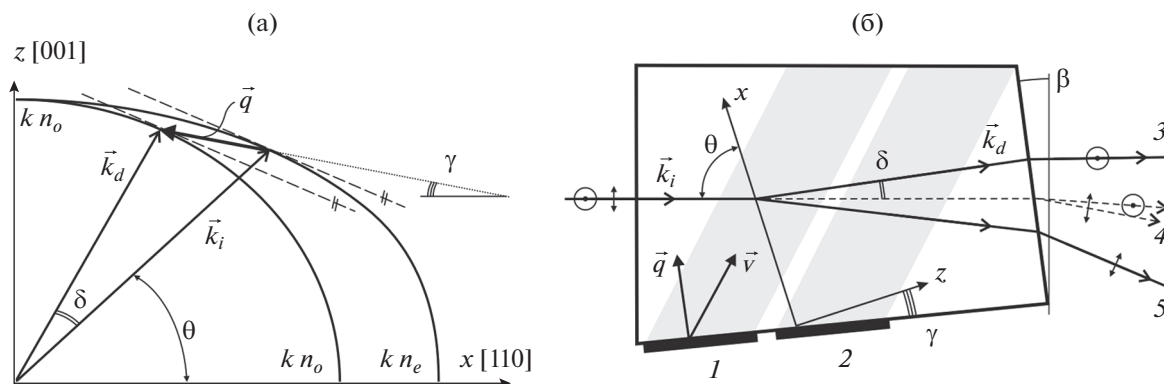


Рис. 1. Векторная диаграмма (а) и оптическая схема (б) АО-ячейки.

зопреобразователей, согласованных на различные поддиапазоны [11]. Несмотря на то, что принципиальная реализуемость такого подхода экспериментально продемонстрирована [12, 13], информации о серийно выпускаемых видеоспектрометрах на основе АО-фильтров с двумя пьезопреобразователями нет.

В предыдущих работах авторов [14–16] представлена оптимальная с точки зрения пространственных искажений геометрия АО-фильтра для широкого спектрального диапазона и экспериментально исследованы два АО-фильтра, построенные по этой геометрии: первый согласован на видимый диапазон, второй – на ближний ИК-диапазон. Также в работах [15, 16] предложена оптическая система на основе АО-фильтра с этой геометрией. В данной работе впервые описан макет видеоспектрометра, работающего в спектральном диапазоне 450...1700 нм, в котором используется одиночная АО-ячейка из кристалла парателлурита (TeO_2) с двумя пьезопреобразователями, форма и геометрия АО-взаимодействия которой оптимизированы для обеспечения высокого качества изображения во всем диапазоне.

1. АКУСТООПТИЧЕСКАЯ ЯЧЕЙКА

На рис. 1 представлены векторная диаграмма (а) и оптическая схема (б) изготовленной АО-ячейки с двумя пьезопреобразователями. Материалом ячейки является наиболее распространенный для устройств видимого и ИК-диапазонов анизотропный одноосный кристалл TeO_2 (парателлурит). Угол среза $\gamma = 7^\circ$. Символами n_o и n_e обозначены показатели преломления материала для обыкновенно и необыкновенно поляризованных волн, k – волновое число. Излучение падает на входную грань по нормали. Угол между волновым вектором падающего излучения \vec{k}_i с осью x составляет $\theta = 73.85^\circ$. При выбранных γ и θ обеспечивается используемый в изображающих АО-устройствах

широкоугольный режим дифракции. Падающее необыкновенно поляризованное оптическое излучение в результате дифракции меняет состояние поляризации на обыкновенное, отклоняется на угол δ , распространяется внутри АОЯ вдоль вектора \vec{k}_d и выходит из АОЯ вдоль направления, обозначенного цифрой 3. Падающее обыкновенно поляризованное излучение тоже дифрагирует, меняя состояние поляризации и отклоняясь в противоположную сторону. Оно выходит из АОЯ по направлению 5. Недифрагированное широкополосное излучение распространяется вдоль вектора \vec{k}_i после двулучепреломления на выходной грани АО-ячейки выходит по двум близким направлениям, как показано штриховой линией 4. В разработанном видеоспектрометре используется только излучение, выходящее вдоль направления 3, остальные направления диафрагмируются.

Пьезопреобразователи 1 и 2 для видимого и инфракрасного (ИК) диапазонов находятся на нижней грани ячейки. Управление АО-фильтром выполняется с помощью высокочастотного (ВЧ)-ячейки генератора. Частота f управляющего сигнала определяет длину волны λ , на которой происходит дифракция, а также влияет на ширину $\Delta\lambda$ спектральной линии пропускания АО-фильтра, а именно $\lambda \sim 1/f$ и $\Delta\lambda \sim 1/f^2$ [17]. Пьезопреобразователь 2 работает на частотах $f = 28...55$ МГц, что соответствует спектральному диапазону $\lambda = 900...1700$ нм; преобразователь 1 работает на частотах $f = 55...120$ МГц, что соответствует диапазону длин волн $\lambda = 450...900$ нм.

Длина каждого пьезопреобразователя 10 мм. Углы сноса акустических волн, сформированных в кристалле обоими пьезопреобразователями (угол между волновым вектором \vec{q} и вектором групповой скорости звука \vec{v}), приблизительно равны 50° . Угол наклона выходной грани, при котором обеспечивается минимальный хроматический сдвиг изображения во всем рабочем спектральном диапазоне, составляет $\beta = 2.3^\circ$ [14, 15].

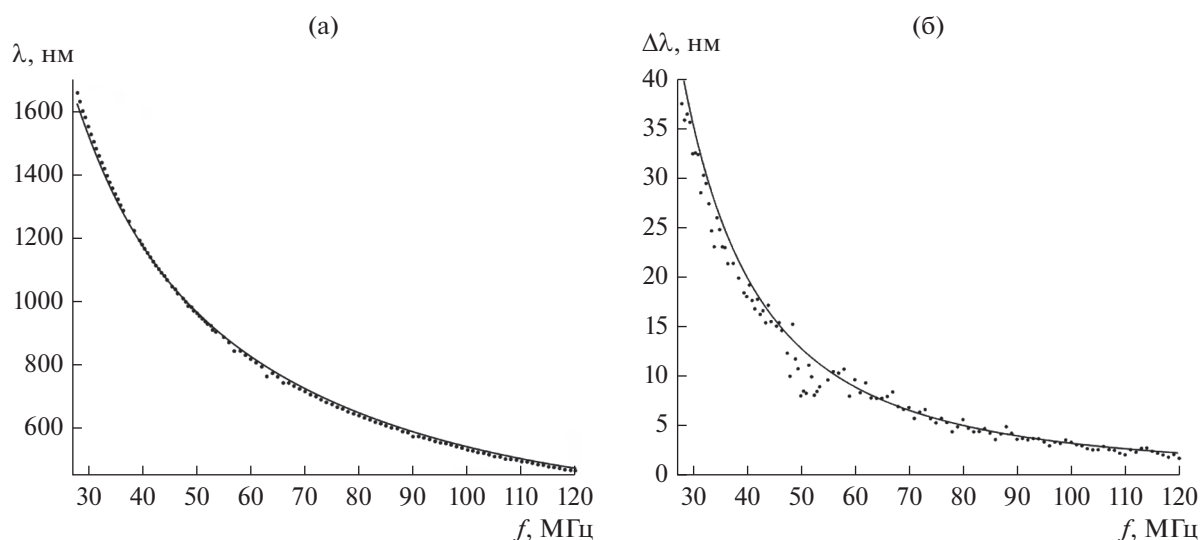


Рис. 2. Зависимость длины волны дифрагируемого света (а) и ширины спектральной линии (б) от частоты подаваемого ультразвука.

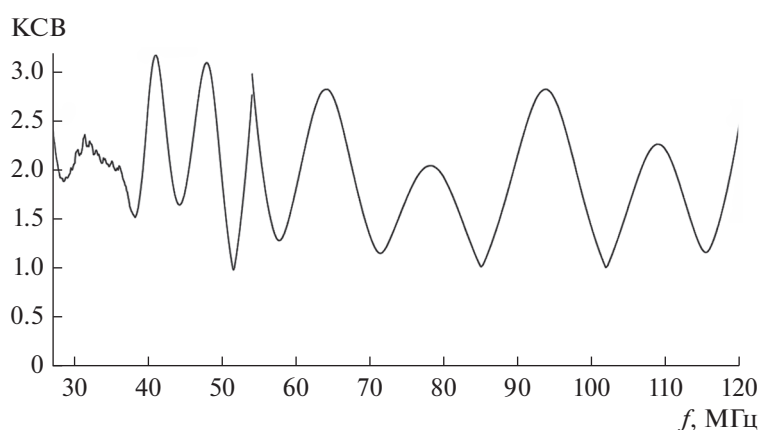


Рис. 3. Частотная зависимость КСВ АО-фильтра.

На рис. 2 представлены экспериментально полученные зависимости длины волны λ и ширины спектрального интервала $\Delta\lambda$ от частоты звука f . Эти зависимости измерены с помощью спектрометра Avesta ASP-IR. Сплошной линией представлены теоретические зависимости.

Одним из показателей эффективности работы АО-фильтра является коэффициент стоячей волны (КСВ), являющийся мерой согласования пьезопреобразователя с генератором управляющего напряжения. Для рассматриваемого типа устройств приемлемым обычно считается КСВ не более 3, при этом амплитуда прошедшего сигнала вдвое больше амплитуды отраженного. В изготовленном АО-фильтре это условие удовлетворено в обоих диапазонах звуковых частот, как показано на рис. 3.

2. ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА ВИДЕОСПЕКТРОМЕТРА

Разработанный АО-фильтр предназначен для работы в изображающем спектрометре, оптическая схема которого предложена в [15, 16]. В данной работе макет этого прибора изготовлен и экспериментально исследован. Функциональная опико-электронная схема и фотография макета показана на рис. 4.

Объект 2 освещается с помощью источника излучения 1. Излучение от объекта коллимируется объективом 3 и направляется в спектрометр. Диафрагма 4 является входным элементом спектрометра. Через нее в спектрометр попадет излучение в виде пучков параллельных лучей, идущих от объекта наблюдения. Вошедшее излучение фо-

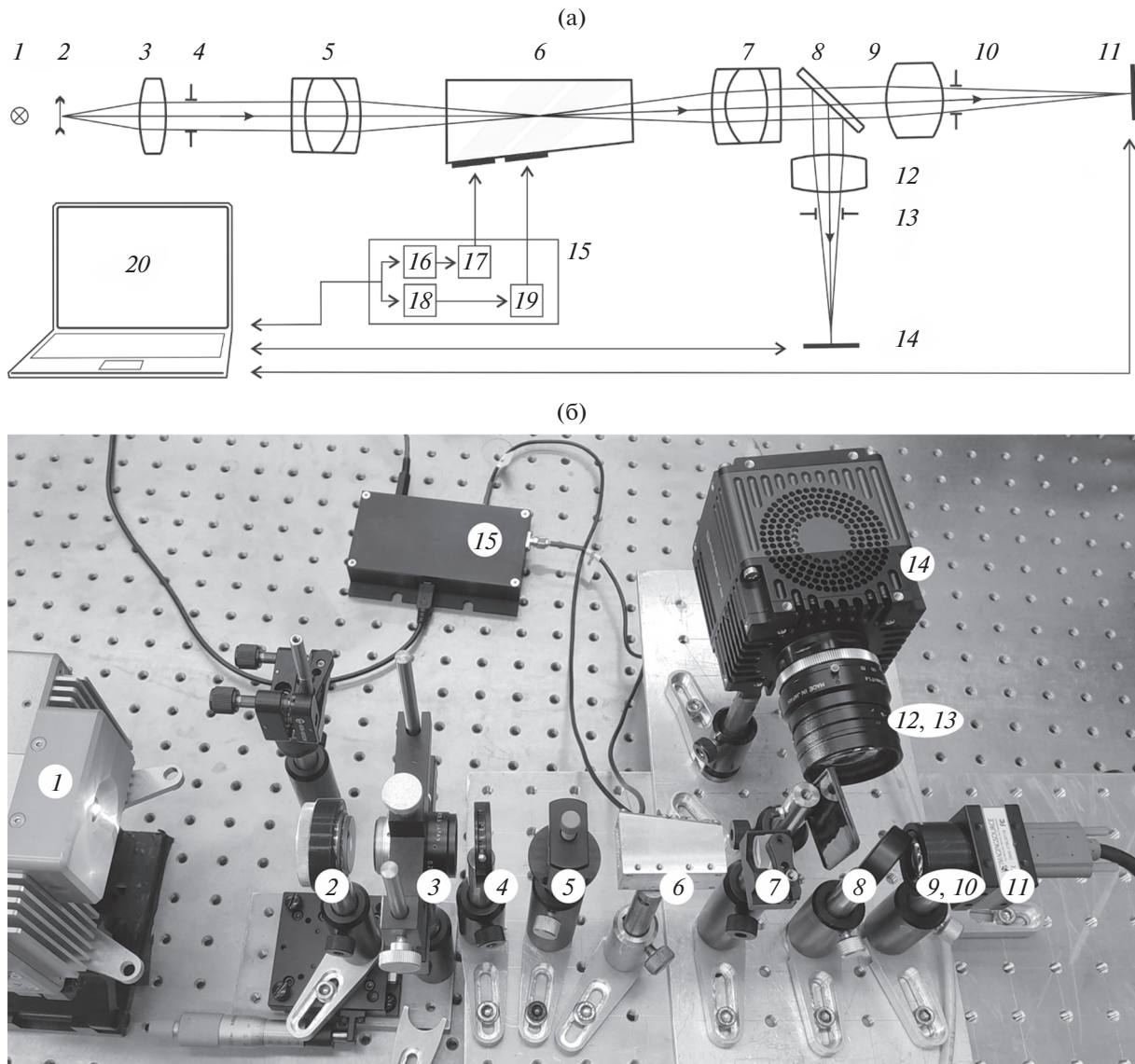


Рис. 4. Функциональная схема (а) и внешний вид (б) макета видеоспектрометра.

кусируется объективом 5 внутри АО-фильтра 6, а затем вновь коллимируется объективом 7. Объективы 5 и 7 идентичны и расположены симметрично относительно АО-фильтра. Дихроичное зеркало 8 делит излучение по спектральному составу: ИК-излучение (0.9...2.7 мкм) отражается зеркалом 8, а видимое (0.45...0.9 мкм) – проходит сквозь него. Объективы 9 и 12 фокусируют излучение на матричных приемниках 11 и 14 через апертурные диафрагмы 10 и 13. Система диафрагм 4, 10 и 13 необходима для устранения излучения, идущего через АО-фильтр без дифракции [18].

Объективы 5 и 7 спроектированы для компенсации хроматизма положения, вносимого АО-филь-

тром [19] и изготовлены специально для макета спектрометра; в качестве объектива 12 использован объектив для ИК-диапазона с фокусным расстоянием 50 мм LM50HC-SW (Kowa), а в качестве объектива 9 стандартный объектив для задач машинного зрения с фокусным расстоянием 35 мм TBL35 (The Imaging Source). В качестве видеокamеры 14 ИК-диапазона использована охлаждаемая камера Goldeye G-032 (Allied Vision Technologies) с размером сенсора $15.9 \times 12.7 \text{ мм}^2$; в видимом диапазоне использована камера 11 на основе монохромной КМОП-матрицы размером $7.4 \times 4.9 \text{ мм}^2$ DMK 37BUX178 (The Imaging Source).

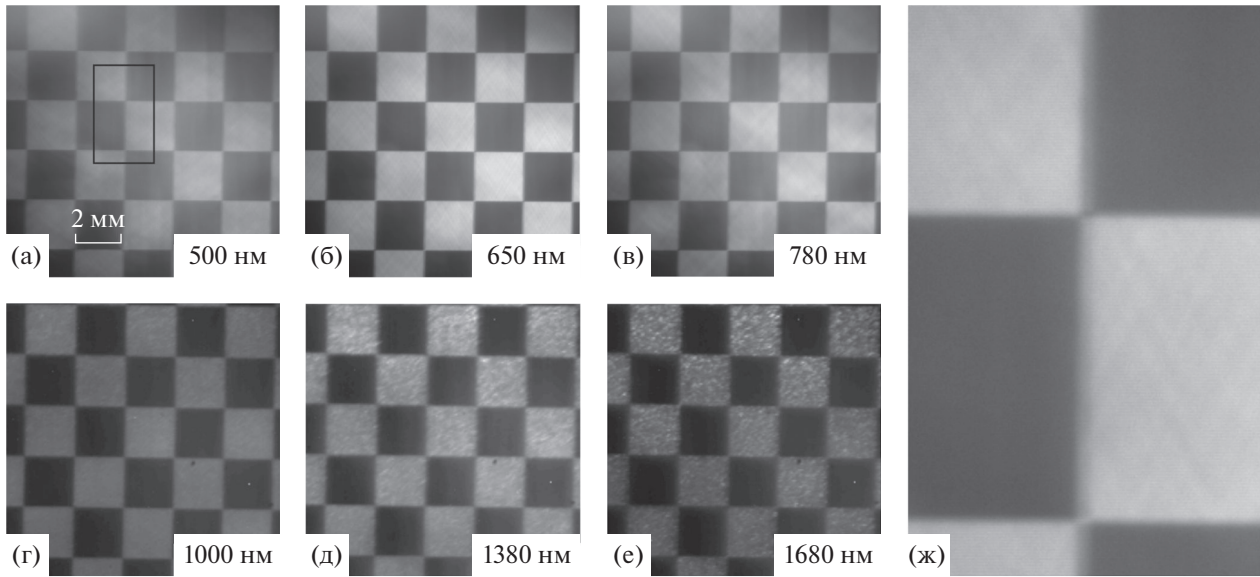


Рис. 5. Спектральные изображения тестового объекта.

АО-фильтр 3 управляется с помощью двухканального драйвера 15, содержащего ВЧ-генераторы 16 и 18, формирующие управляющий электрический сигнал в диапазонах 27...54 МГц (генератор 18) и 54...120 МГц (генератор 16), и усилители 17 и 19.

Видеокамеры 11 и 14 видимого и ИК-диапазонов, а также драйвер АО-фильтра 15 управляются персональным компьютером 20 через оригинальное специализированное программное обеспечение.

На рис. 5 показаны некоторые из зарегистрированных изображений тестового объекта, по которым вычислена разрешающая способность. Рисунок 5ж иллюстрирует увеличенный фрагмент рис. 5а; соответствующая область показана прямоугольником. Как видно из рис. 5ж, размытие горизонтальных линий меньше, чем вертикальных. Это объясняется тем, что АО-фильтр ориентирован так, что акустическая волна распространяется горизонтально и при АО-взаимодействии происходит небольшое снижение качества изображения, которое становится заметным в конфокальной схеме АО-фильтрации [20].

На рис. 6 представлены графики модуляционно-передаточной функции (МПФ), являющейся одним из показателей качества, по которым принято оценивать изображающие оптические системы. Сплошными линиями представлены результаты, полученные стандартным методом пограничной кривой [21, 22] по изображениям тестового объекта, представленным на рис. 5. Множество линий на каждом графике идентифицирует различные участки изображений. Штриховая линия является ре-

зультатом расчета оптической системы в программе ZEMAX [19] и показывает усредненную по всему полю зрения МПФ. Для каждой длины волны приведены по два графика – полученные по обработке горизонтальных или вертикальных линий изображения. По указанным причинам величина размытия горизонтальных линий меньше, что проявляется в заметно больших значениях соответствующих МПФ. При моделировании не удается в полной мере учесть искажения при АО-взаимодействии, поэтому теоретические (штриховые) кривые для горизонтальных и вертикальных линий почти идентичны.

В ИК-области использован приемник излучения с размером пикселя 25 мкм. В данном случае его влияние на разрешающую способность оказывается больше, чем влияние aberrаций оптической системы. Этим объясняется существенное различие теоретических и экспериментальных кривых рис. 6 на длинах волн 1000 и 1680 нм, так как дискретизация приемника не учитывается при моделировании оптической системы в ZEMAX.

Из графиков видно, что разрешающая способность (по уровню контраста 0.2) в коротковолновом диапазоне меняется в пределах от 25 до 50 линий на 1 мм, а в длинноволновом – от 3 до 10 линий на 1 мм. Таким образом, учитывая размеры изображений, сформированных на приемниках излучения, пространственное разрешение видеоспектрометра в коротковолновой (видимой) области составляет приблизительно 250×180 элементов, а в длинноволновой (ИК) – 120×100 элементов.

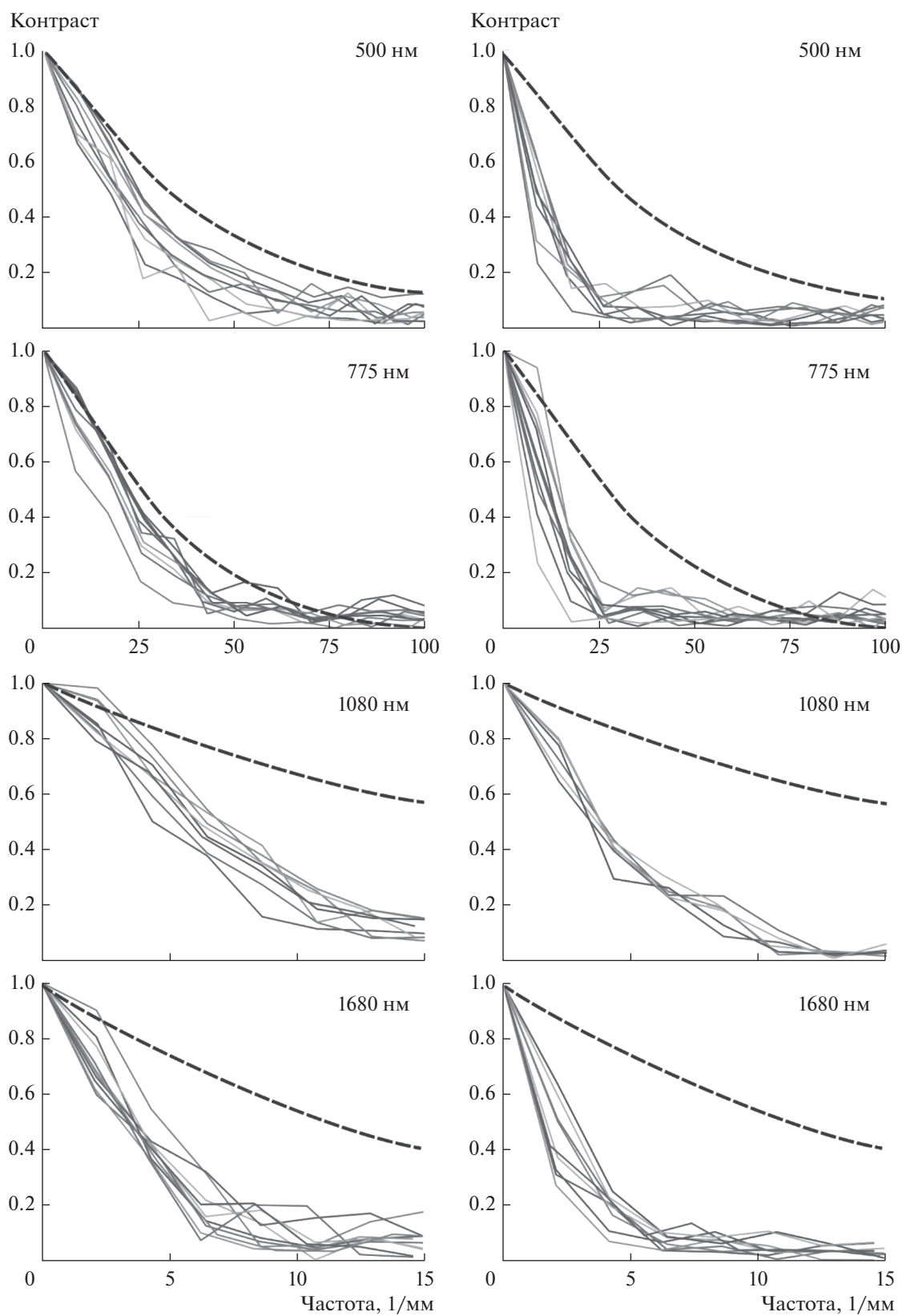


Рис. 6. Расчетные (штриховая кривая) и экспериментально определенные (сплошные кривые) МПФ для горизонтальных (слева) и вертикальных (справа) элементов изображения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Элементная база оптико-электронных приборов быстро развивается во всем мире, что позволяет создавать новые типы приборов и существенно расширять возможности существующих. В последнее время появились матричные приемники излучения на основе InGaAs структуры, работающие в широком спектральном диапазоне (400...1700 мкм) (например, https://www.photonics.com/Products/Visible_SWIR_Camera/pr60732). Использование одного такого приемника излучения и одного АО-фильтра, подобного представленному в данной работе, позволяет создать компактный АО-видеоспектрометр, работающий в широком спектральном диапазоне, обычно покрываемом двумя различными АО-фильтрами и двумя приемниками излучения. Таким образом, в двухдиапазонном видеоспектрометре вдвое расширен спектральный диапазон при неизменных массогабаритных характеристиках, что делает этот прибор перспективным для применения, например, в дистанционном зондировании с использованием беспилотных летательных аппаратов, где масса и габариты особо важны. Прибор может найти применение и в других отраслях – в микроскопии, биомедицине, в технической диагностике.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-29-20095). В части технологии изготовления АО-кристаллов работа проводилась в рамках государственного задания ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН (№ АААА А19 119073190049 2).

При выполнении работы использовано оборудование Центра коллективного пользования НТЦ УП РАН (<https://ntcup.ru/ckp-i-upu/>) и оборудование Уникальной научной установки “Лазерный нагрев в ячейках высокого давления” НТЦ УП РАН (<https://ckprf.ru/usu/507563/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балакиев В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.И. Физические основы акустооптики. М: Радио и связь, 1985.
2. Мазур М.М., Пожар В.Э. // Измерит. техника. 2015. № 9. С. 29.
3. Молчанов В.Я., Китаев Ю.И., Колесников А.И. и др. Теория и практика современной акустооптики. М.: ИД МИСиС, 2015.
4. Dekemper E., Loodts N., Opstal B.V. et al. // Appl. Optics. 2012. V. 51. № 25. P. 6259.
5. Morris H.R., Hoyt C.C., Treado P.J. // Appl. Spectroscopy. 1994. V. 48. № 7. P. 857.
6. Yushkov K.B., Champagne J., Kastelik J.-C. et al. // Biomed. Opt. Express. 2020. V. 11. № 12. P. 7053.
7. Bouhifd M., Whelan M., Aprahamian M. // Proc. SPIE. 2003. V. 5143. P. 305.
8. Мачихин А.С., Пожар В.Э., Батшеев В.И. // Приборы и техника эксперимента. 2013. № 4. С. 117.
9. Machikhin A., Pozhar V., Viskovatykh A., Burmak L. // Appl. Optics. 2015. V. 54. № 25. P. 7508.
10. Design and Fabrication of Acousto-Optic Devices / Eds. by Goutzoulis A., Pape D. Boca Raton: CRC Press, 1994.
11. Gupta N., Voloshinov V.B. // Appl. Optics. 2007. V. 46. № 7. P. 1081.
12. Zhao H. et al. // Opt. Express. 2017. V. 25. № 20. P. 23809.
13. Kozun M.N., Bourassa A.E., Degenstein D.A., Loewen P.R. // Rev. Scientific Instruments. 2020. V. 91. № 10. P. 103106.
14. Мачихин А.С., Батшеев В.И., Пожар В.Э., Боритко С.В. // Оптический журн. 2019. Т. 86. № 12. С. 59.
15. Батшеев В.И., Мачихин А.С., Козлов А.Б. и др. // РЭ. 2020. Т. 65. № 7. С. 667.
16. Batshev V., Boritko S., Kozlov A. et al. // Proc. Int. Conf. Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF), 31 May–4 June, 2021, P. 1–4.
17. Chang I.C. // Electron. Lett. 1975. V. 11. № 25–26. P. 617.
18. Batshev V., Machikhin A., Martynov G. et al. // Sensors. 2020. V. 20. № 16. P. 4439.
19. Machikhin A., Batshev V., Pozhar V. // J. Opt. Soc. Amer. A. 2017. V. 34. № 7. P. 1109.
20. Wachman E.S., Niu W., Farkas D.L. // Appl. Optics. 1996. V. 35. № 5. P. 220.
21. Photography—Electronic Still Picture Cameras—Resolution Measurements, ISO Standard 12233: 2000 Geneva: Int. Organization for Standardization, 32 p.
22. Kenichiro M., Takayuki Y., Yukihiko N., Masayuki S. // Opt. Express. 2014. V. 22. № 5. P. 6040.